

**ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE POUR L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE
D'ANTSIRANANA
BP : 0 ANTSIRANANA(201)-MADAGASCAR**

Département : ÉLECTRICITE

Filière : GÉNIE ÉLECTRIQUE

**CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE À L'AIDE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE
(01 étudiant-PETGE5)**

Introduction :

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent. Une éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. La machine asynchrone peut l'utiliser en génératrice. La variation brusque de la vitesse du vent sur l'éolienne entraîne des changements sur la caractéristique de l'énergie produite.

Travaux demandés :

1. Notion générale sur l'énergie éolienne ;
2. Décrire les principes de fonctionnement d'une éolienne ;
3. Concentrer sur l'étude de la conversion avec M.A.S (Couplage direct) ;
4. Modéliser le système Machine/Turbine ;
5. Introduire une variation brusque de la vitesse du vent sur la turbine ;
6. Simuler le système à l'aide Matlab/Simulink ;
7. Analyser le comportement de la génératrice et la turbine en augmentant le couple résistant et la constante d'amortissement ;
8. Donner l'allure du couple électromagnétique, courant, la vitesse de rotation de la turbine et les puissances ;
9. Interpréter les résultats ;
10. Conclure.

Encadreurs :

M. TSIMA Aristol ;

Dr. RABE Tsirobaka.

REMERCIEMENTS

Premièrement, je remercie Dieu de m'avoir donné le courage, la volonté, la force et la santé durant ces cinq années d'études et que grâce à lui ce travail de mémoire a pu être réalisé.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mes encadreurs :

Dr. RABE Tsirobaka, Docteur-Ingénieur, et Mr. TSIMA Aristol qui m'ont proposé ce sujet et n'ont cessé de donner leurs précieux conseils.

Mes remerciements sont aussi adressés au département d'ELECTRICITE de l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique d'Antsiranana (ENSET-A) et à tous les enseignants qui m'ont enseigné durant les années de mon cursus.

Ma profonde gratitude va également à Monsieur Le Président de jury et à Messieurs les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.

Je voudrais remercier tout particulièrement ma mère GEORGINE et mon frère RATIANASON de m'avoir soutenu moralement et financièrement et qui n'ont ménagé ni force, ni argent, ni temps pour que j'arrive à ce stade.

Mes remerciements sont adressés également aux étudiants de ma promotion, aux Jeunes Universitaires Dauphins du Frère Rafiringa (JUDFRa) et à l'Aumônerie Catholique Universitaire d'Antsiranana qui ont su créer une atmosphère fraternelle durant toutes mes études.

Merci à vous tous !

RAZAFIMORA Tawella

LISTE DES SYMBOLES

A: Aire de la section
 C_{em} : Couple électromagnétique
 C_p : Coefficient de puissance
 C_r : Couple résistant
D : Force de traînée
 D_r : Diamètre du rotor
 D_m : Coefficient d'amortissement
g : Glissement
 K_m : Coefficient de rigidité
 L_{AA} : Inductance propre d'une phase rotorique
 L_{AB} : Inductance mutuelle entre phase rotorique
 L_r : Inductance cyclique propre du rotor
 L_s : Inductance cyclique propre du stator
 $M = L_{sr}$: Inductance mutuelle stator rotor
p: Nombre de paires de pôles
 P_a : Puissance active
 P_{mt} : Puissance mécanique de la turbine
 P_r : Puissance réactive
R : Rayon de la turbine
 R_s : Résistance statorique
 R_r : Résistance rotorique
S: Section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor
 T_m : Couple mécanique de la turbine
 $V_v = V$: vitesse du vent
 β : Angle de calage
 Ω : Vitesse angulaire de rotation des pales
 ψ_{dr} : Flux rotorique dans l'axe d
 ψ_{qs} : Flux statorique dans l'axe q
 ω_m : Vitesse du rotor
 ω_r : Vitesse du champ tournant rotorique
 ω_s : Vitesse du champ tournant statorique

Indice

d: axe direct
q: axe inverse
o: axe homopolaire
a: phase statorique a
b: phase statorique b
c: phase statorique c
s: stator
r: rotor

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 Schéma fonctionnel de conversion de l'énergie cinétique du vent.....	2
Fig.1.2 Schéma descriptif d'une éolienne.....	5
Fig.1.3 Eoliennes à axe vertical.....	5
Fig.1.4 Eoliennes à axe horizontal.....	5
Fig.1.5 Eolienne multipale.....	5
Fig.1.6 Hélice au vent.....	6
Fig.1.7 Hélice sous le vent.....	6
Fig.1.8 Principe général de fonctionnement d'un aérogénérateur.....	6
Fig.1.9 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.....	7
Fig.2.1 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.....	11
Fig.2.2 Colonne d'air.....	12
Fig.2.3 Bilan des puissances de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.....	13
Fig.2.4 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.....	14
Fig.2.5 Connexion d'une machine asynchrone à double stator.....	15
Fig.2.6 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur- onduleur.....	16
Fig.3.1 Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents.....	19
Fig.3.2 Transformation des grandeurs statoriques.....	20
Fig.3.3 Transformation des grandeurs rotoriques.....	21
Fig.3.4 Développement du bloc de transformation direct de Park.....	30
Fig.3.5 Développement du bloc de transformation inverse de Park.....	30
Fig.3.6 Schéma bloc de la machine asynchrone.....	31
Fig.3.7 Schéma bloc de l'ensemble.....	31
Fig.4.1 Composante lente.....	34
Fig.4.2 Composante de turbulence.....	34
Fig.4.3 Forces des poussées axiales et tangentielles agissant sur l'élément de pale.....	35
Fig.4.4 Caractéristique de C_p en fonction de β et λ simulé en matlab.....	37
Fig.4.5 Schéma de la turbine à vent.....	38
Fig.4.6 Schéma bloc de la simulation.....	38
Fig.4.7 Courbe de la puissance mécanique.....	39
Fig.4.8 Courbe du couple mécanique.....	39
Fig.4.9 Couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique.....	40
Fig.4.10 Courbe du courant statorique.....	41
Fig.4.11 Courbe du couple électromagnétique.....	42
Fig.4.12 Courbe de la vitesse.....	42
Fig.4.13 Schéma bloc de l'ensemble machine turbine et mécanique.....	43
Fig.4.14 Courbe du courant et du couple électromagnétique.....	44
Fig.4.15 Courbe de puissance active.....	44

Fig.4.16 Courbe de puissance réactive.....	45
Fig.4.17 Puissance active sous l'effet de variation du vent.....	45
Fig.4.18 Puissance réactive sous l'effet de variation du vent.....	46
Fig.4.19 Courbe du courant statorique.....	46
Fig.4.20 Puissance mécanique et couple mécanique de la turbine.....	47
Fig.4.21 Courbe du couple électromagnétique avec l'augmentation du couple résistant.....	47
Fig.4.22 Vitesse de rotation de la turbine.....	48..
Fig.4.23 Vitesse de rotation de la génératrice.....	48
Fig.5.1 Bilan des puissances d'une machine asynchrone.....	53
Fig.5.2 Modèle par phase lors de l'essai à vide.....	57
Fig. A.1 Schéma bloc de la source.....	64
Fig. A.2 Schéma fonctionnel du vent.....	65
Fig. A.3 Schéma bloc de la partie mécanique à deux masses.....	65
Fig. A.4 Schéma bloc de la machine asynchrone avant de coupler à la partie mécanique.....	66
Fig. A.5 Augmentation de la vitesse au-delà du synchronisme.....	66

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'énergie électrique est un élément incontournable dans la vie des sociétés et des entreprises. La plupart des communes à Madagascar connaissent un problème énergétique aigu dû à l'insuffisance des sources conventionnelles d'énergies. Or, un pays ne sera pas développé s'il ne possède pas d'une grande source d'énergie qui peut répondre constamment aux besoins des clients. L'éolienne est une énergie « renouvelable » la plus fiable et la plus efficace et permet une production énergétique décentralisée sans pollution, sans émission de gaz à effet de serre.

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette avec un potentiel mondial environ de 30.10^{15} kWh/an. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses.

Dans le cadre de travail de ce mémoire, on s'intéresse à l'étude d'une éolienne, plus exactement la conversion de l'énergie éolienne à l'aide d'une machine asynchrone ; c'est-à-dire un aérogénérateur est connecté avec une génératrice asynchrone pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons divisé ce travail de mémoire en cinq parties : Dans le chapitre premier, nous décrirons les généralités sur l'énergie éolienne. Dans le second chapitre, nous montrerons les principes de conversion d'énergie éolienne. La connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau, la machine asynchrone à double stator seront présentées. Nous verrons dans le troisième chapitre, la modélisation d'une machine asynchrone. On y trouve les équations mathématiques de la machine comme les équations de tensions, de courants, des flux, de couple, en utilisant les transformations de Park pour établir le schéma bloc. Le quatrième chapitre parlera de la modélisation de l'éolienne et sa simulation. Ce chapitre est basé sur l'étude de la turbine. On va voir aussi les résultats de simulation pour le comportement du moteur et de la génératrice asynchrone associé avec la turbine ; les interprétations des courbes obtenus et l'analyse des résultats.

Enfin, pour justifier son titre de mémoire fait dans une Ecole normale, le travail se termine par une implication pédagogique. Nous allons traiter deux thèmes sur l'un l'étude théorique et l'autre sur l'étude pratique d'une machine asynchrone.

Chapitre 1 : GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE

1.1 HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de « moulins », ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^{ème} siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^{ème} siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30 000 et dans toute l'Europe à 200 000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poule La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [2].

1.1.1 Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, ou proprement dit une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

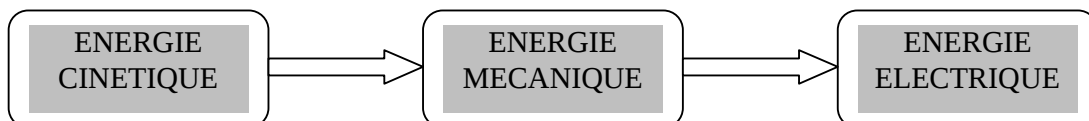


Fig.1.1 Schéma fonctionnel de conversion de l'énergie cinétique du vent.

C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution. Les installations peuvent être réalisées sur

terre, mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

On distingue trois catégories d'éoliennes selon leur puissance nominale à savoir :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

1.1.2 Descriptif d'une éolienne

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Etant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de haut. Typiquement, une éolienne de 1MW a une hauteur de 80 mètres de haut, ce qui correspond à la hauteur d'un immeuble de 32 étages. La tour a la forme d'un tronc en cône où, à l'intérieur, sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion aux réseaux de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle. La nacelle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande.

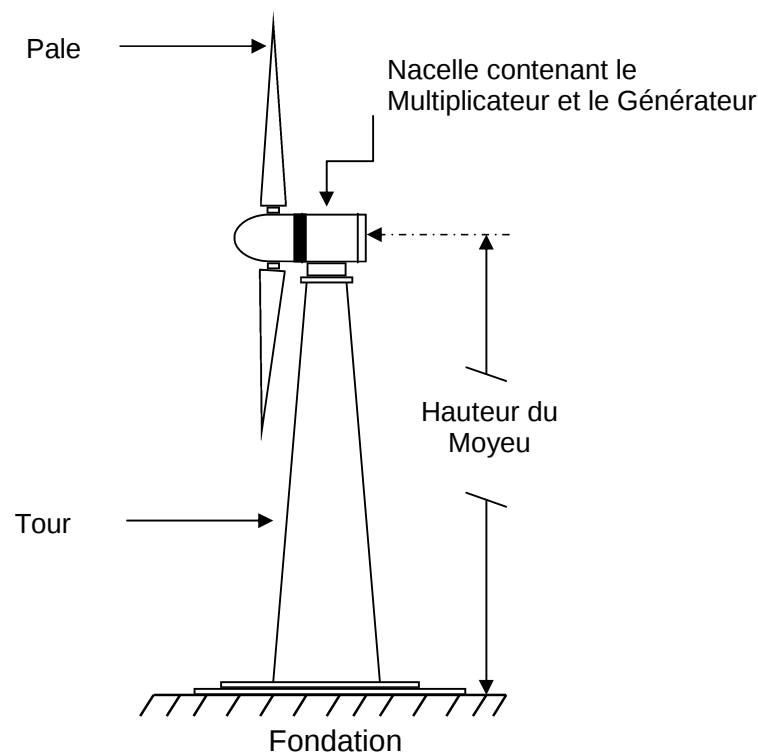


Fig.1.2 Schéma descriptif d'une éolienne.

1.1.3 Principales composantes d'une éolienne

En général, une éolienne classique est constituée trois principaux éléments :

1.1.3.1 Le mât

Le mât est fabriqué par un tube d'acier ou par un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

1.1.3.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lents et rapides, roulements, multiplicateur, le frein à disque, différent du frein aérodynamique, et qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

1.1.3.3 Le rotor

Le rotor convertit l'énergie du vent en énergie mécanique par l'entraînement de son arbre. Il peut être 1 à 3 pales, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Selon les caractéristiques de leur vitesse, le rotor est classé en deux types :

D'une part, les rotors à vitesse fixe sont les premiers à avoir été développés. Ils sont souvent utilisés une génératrice asynchrone à cage d'écureuil connectée directement au réseau (fig.2.4). D'autre part, les rotors à vitesse variable sont basés sur la machine asynchrone à double alimentation. Ils sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié.

1.2 DIFFERENTS TYPES D'EOLIENS

On classe les éoliennes suivant le dispositif géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types d'éoliennes à savoir :

- Eoliennes à axe vertical,
- Eoliennes à axe horizontal.

1.2.1 Eoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne est très peu répandu et assez mal connu car la fréquence de rotation de pale est faible et donc leur rendement est moins bon. Elles sont représentées par la figure 1.3.[3]

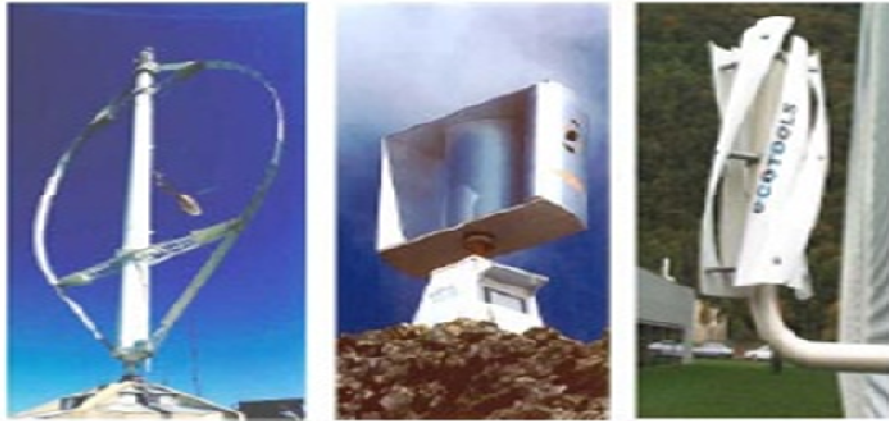


Fig.1.3 Eoliennes à axe vertical.

1.2.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de l'éolienne à axe vertical. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les éoliennes dont l'hélice est en amont par rapport au vent (hélice au vent), et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent (hélice sous le vent).



Fig. 1.4 Eolienne à axe horizontal.

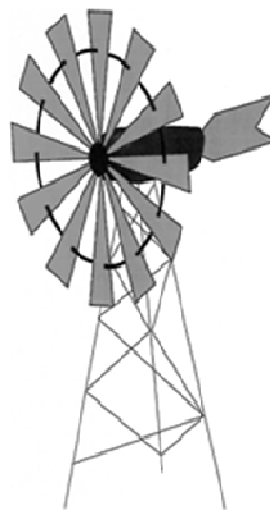


Fig. 1.5 Eolienne multipale.

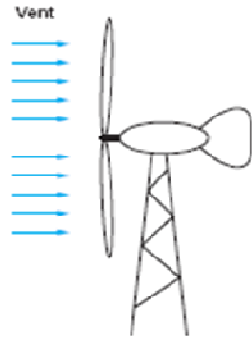


Fig.1.6 Hélice au vent.

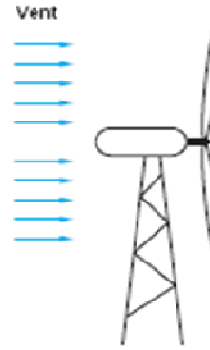


Fig.1.7 Hélice sous le vent.

1.3 FONCTIONNEMENT D'UN AEROGENERATEUR

La force du vent fait tourner les pales du rotor. L'énergie mécanique produite par cette rotation est transformée en énergie électrique. Une nacelle, située en haut du mât renferme la génératrice électrique, entraînée par les pales. L'électricité produite est acheminée par un câble électrique souterrain jusqu'à un poste de raccordement au réseau EDF.

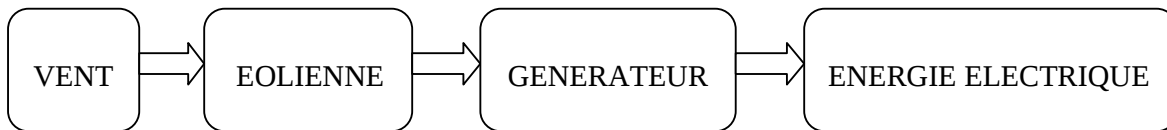


Fig.1.8 Principe général de fonctionnement d'un aérogénérateur.

De plus, les vibrations diminuent quand le nombre de pales augmente. Plus les mécanismes sont fatigués, plus certaines vibrations sont audibles. Quand une pale est en rotation, la vitesse relative du vent par rapport à la pale est supérieure à sa vitesse propre, et dépend de l'éloignement du point considéré de la pale avec son axe de rotation. Cela explique que le profil et l'orientation de la pale varient dans sa longueur.

1.3.1 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mât et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle l'éolienne a été conçue. V_D est la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et V_M est la vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

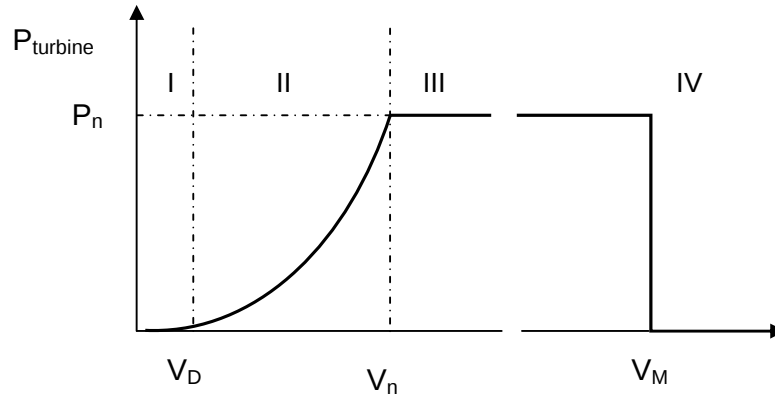


Fig.1.9 Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent du diagramme ci-dessus comporte quatre zones :

- La zone I, où $P_{\text{turbine}} = 0$: la turbine ne fournit pas de puissance.
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent V_M .
- La zone III, où généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et où la puissance P_{turbine} fournie reste sensiblement égale à P_n .
- La zone IV, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

1.4 MARCHE DES CENTRALES EOLIENNES

Le marché des éoliennes peut être divisé selon l'utilisation finale de la technologie. Celle-ci est couramment exploitée pour des applications hors réseau. Toutefois, ce sont des applications avec raccordement au réseau électrique qui présentent le plus grand potentiel commercial [1].

1.4.1 Application hors réseau

Dans ce type d'application hors réseau, l'énergie du vent est captée par les éoliennes afin de recharger les batteries. L'énergie électrique ainsi emmagasinée permet alors de fournir de l'électricité sur demande. Le pompage de l'eau, où l'eau peut aussi être emmagasinée en vue d'un usage ultérieur, est par ailleurs une des plus anciennes formes d'exploitation de l'énergie éolienne.

1.4.2 Application en réseau

Les systèmes éoliens raccordés à un réseau électrique transfèrent directement l'énergie produite au réseau. On distingue deux types d'applications :

- Le réseau isolé, où la puissance installée par éolienne varie en général de 10 kW à 200KW environ.

- La centrale éolienne avec raccordement à un réseau central, où la puissance installée par éolienne varie en général de 200kW à 2MW.

a) Réseaux isolés

Dans les régions éloignées, la production d'électricité est généralement coûteuse en raison du prix élevé du transport de carburant peut être installée pour fournir de l'électricité en complément de la centrale diesel. Ces centrales sont désignées normalement sous le nom de systèmes hybrides éolien-diesel. La fonction première de la centrale éolienne est de contribuer à réduire la consommation de carburant diesel.

b) Réseaux centraux

Les applications avec raccordement à un réseau central se répandent de plus en plus. Dans les régions relativement venteuses, les éoliennes sont regroupées pour former des parcs d'éoliennes ayant une capacité totale de plusieurs mégawatts. Habituellement, la superficie occupée par le parc d'éoliennes sert aussi à d'autres fins, comme l'agriculture ou la sylviculture. Par ailleurs, une autre forme répandue d'exploitation de l'énergie éolienne inclut l'installation d'une ou plusieurs grandes éoliennes par des particuliers, des entreprises ou coopératives.

Conclusion

Nous avons établi les généralités sur l'énergie éolienne. Une éolienne est perpendiculaire au vent, montée sur un mât. En grosso modo, le vent a une force qui fait tourner les pales du rotor, il produit une énergie cinétique et entre sur la partie mécanique pour transformer en énergie électrique à l'aide d'une génératrice renfermée par la nacelle. De plus, le coût d'une éolienne dépend de la caractéristique de son rotor et de ses nombres de pales. Maintenant le rotor à vitesse fixe est le plus souvent employé car il est simple et faible coût. Il est aussi facile à utiliser l'éolienne à une génératrice asynchrone directement connectée au réseau. Le chapitre précédent est concentré sur les principes de conversion d'énergie éolienne basée sur la machine asynchrone. Nous allons voir la connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Chapitre 2 : PRINCIPES DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

INTRODUCTION

Dans cette partie, nous allons nous intéresser aux dispositifs de conversion permettant de transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. Il existe plusieurs principes de conversion d'énergie éolienne avec la machine asynchrone. Mais pour notre étude, on est basé sur le couplage direct. On choisit les machines électriques asynchrones car elles sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

2.1 MACHINE ASYNCHRONE

Les machines asynchrones sont des machines à courant alternatif dont la vitesse en charge et la fréquence de réseau auquel elle est reliée, ne sont pas dans le rapport constant. L'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique.

Elles sont utilisées pour la traction ferroviaire dans les derniers modèles du train à grande vitesse (TGV). Elles peuvent également être employées dans une éolienne pour une production d'énergies renouvelables.

2.1.1 Types de machines asynchrones

Du point de vue constructif, on distingue deux types principaux de machines asynchrones :

- machines à rotor en court-circuit ;
- machines à rotor bobiné ou à bague.

Les machines asynchrones à rotor en court-circuit sont munies d'un enroulement constitué par des barres nues court-circuitées.

Elles sont de trois types :

- à encoches profondes ;
- à double cage d'écureuil ;
- rotor à cage d'écureuil simple.

2.1.2 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.

Une machine asynchrone peut fonctionner soit en moteur, soit en générateur. L'emploi de la machine asynchrone comme moteur est le plus fréquent, le glissement g est positif et le rotor tourne à la vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant, le moteur reçoit donc du réseau de l'énergie active et réactive.

Pour le fonctionnement en génératrice, le glissement g est négatif et le rotor tourne à une vitesse légèrement supérieure à celle du champ tournant. La génératrice fournit de la puissance active mais elle continue d'absorber de la puissance réactive qui est nécessaire à son alimentation. Cette partie est essentielle pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique de la base de notre étude.

Pour passer du fonctionnement moteur en générateur, il faut que trois conditions soient respectées :

- ✓ entraîner le rotor à une vitesse hypersynchrone ;
- ✓ fournir de la puissance réactive ;
- ✓ existence du flux ou tension rémanente.

- **Glissement**

Le glissement est défini par la formule suivante :

$$g = \frac{n_s - n}{n_s}; \quad (2-1)$$

où g : glissement

n_s : vitesse de rotation du champ statorique ;

n : vitesse de rotation mécanique du rotor ;

$$n_s = \frac{\omega_s}{2p\pi}; \quad (2-2)$$

$$n = \frac{\omega}{2p\pi}; \quad (2-3)$$

ω_s et ω : désignent respectivement les pulsations des courants statorique et rotorique.

On remplace n_s et n dans l'équation de glissement par leurs expressions respectives dans

(2-2), (2-3), on obtient :

$$g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}; \quad (2-4)$$

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega}; \quad \Omega_s \text{ et } \Omega : \text{ sont des vitesses de rotation du champ tournant statorique et vitesse de rotation de l'arbre du rotor.} \quad (2-5)$$

$$\text{avec } \omega_s = p\Omega_s \text{ et ;} \quad (2-6)$$

$$\omega = p\Omega. \quad (2-7)$$

Si $\Omega < \Omega_s$ la machine fonctionne en moteur, par contre elle fonctionne en génératrice lorsque $\Omega > \Omega_s$.

2.1.3 Equation du mouvement de la machine asynchrone

Dans une machine, le transfert de l'énergie par l'entrefer est lié aux forces d'origine électromagnétique développées dans le rotor et créant un couple qui est le couple électromagnétique. L'équation du mouvement est s'écrit comme suit :

$$C_{em} = C_r + \frac{J d_r}{dt} ; \quad (2-8)$$

On remplace Ω de l'équation (2-7) dans l'équation (2-8) on a :

$$C_{em} = C_r + \frac{J}{p} \frac{d_r}{dt} ; \quad (2-9)$$

avec C_{em} : couple électromagnétique ;

C_r : Couple résistant ;

J : moment d'inertie total des masses tournantes en kg.m^2 ;

p : nombre de paires de pôles.

2.2 CHAÎNE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE

L'énergie en provenance du vent traverse la voilure qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. La voilure est directement accouplée à la génératrice et permet la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Les composants électriques tels que convertisseurs statiques et éléments de filtrage disposés en aval de la génératrice ont un rôle d'adaptation active des caractéristiques de l'énergie électrique entre la génératrice et la charge finale. La charge, sous la forme d'un pack de batteries, donc d'éléments électrochimiques, est un élément de stockage. L'énergie stockée peut être ensuite distribuée vers un éventuel réseau sur lequel sont rattachés des consommateurs (Fig. 2.1) [2].

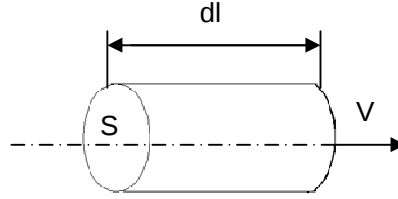


Fig.2.1 Chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

2.2.1 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie cinétique dE d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse V est donnée par la formule [8] :

$$dE = \frac{1}{2} \rho S dl V^2 ; \quad (2-10)$$

**Fig.2.2 Colonne d'air.**

avec :

ρ : la masse volumique de l'air ($\rho \cong 1.25 \text{ kg/m}^3$) ; S : la section du tuyau ; V : la vitesse du vent ; dl : la longueur élémentaire d'une colonne d'air.

Si on pose $dl = vdt$, on obtient l'expression de la puissance P_o :

$$P_o = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V^2. \quad (2-11)$$

2.2.2 Puissance fournie par l'énergie du vent

Pour une conduite de section S traversée par le vent soufflant à une vitesse v (m/s), l'énergie récupérable chaque seconde, donc la puissance peut s'écrire à l'aide de l'équation de l'énergie cinétique. La masse m est alors remplacée par le débit massique $\dot{m}$ (kg/s) pour passer l'énergie à la puissance.

Pour un fluide incompressible, la masse s'écrit :

$$m = \rho \cdot l \cdot S ; \quad (2-12) \quad l :$$

la longueur de tuyau parcourue chaque seconde par le vent.

On obtiendrait alors l'énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 ; \quad (2-13)$$

En remplaçant m par sa valeur, on a :

$$E_c = \frac{1}{2} \rho \cdot l \cdot S \cdot V^2. \quad (2-14)$$

Le débit massique serait :

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot S. \quad (2-15)$$

S : la section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor.

La puissance P s'écrit alors :

$$P = \frac{1}{2} \dot{m} V^2 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (2-16)$$

L'aire balayée par le rotor est proportionnelle au carré du diamètre D_r du rotor.

$$\text{Aire} = \frac{\pi D_r^2}{4} ; \quad (2-17)$$

On obtient finalement :

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D_r^2}{4} V^3. \quad (2-18)$$

2.2.3 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique

Comme nous avons déjà évoqué à l'aide de la machine asynchrone qui fonctionne en moteur, nous avons augmenté la vitesse du rotor de la machine de façon que n soit devenue supérieure que la vitesse du synchronisme n_s . Dans ce cas, le glissement devient négatif et le sens de rotation de flux par rapport au rotor change de signe. Le couple développé par le générateur devient résistant par rapport au couple du moteur. Alors, l'énergie mécanique fournie par son arbre transforme en énergie électrique qui est livrée au réseau.

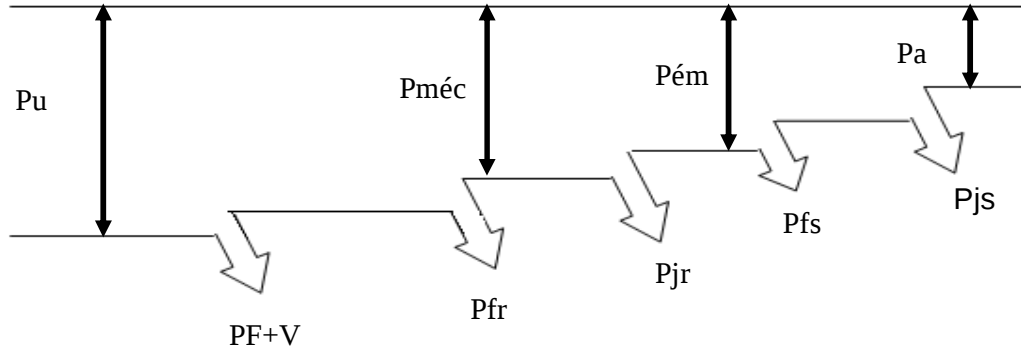


Fig.2.3 Bilan des puissances de conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

P_u : Puissance mécanique utile ; $PF+V$: Perte par frottement et ventilation ; P_{mec} : Puissance mécanique ; P_{fr} : Perte fer rotorique ; P_{jr} : Perte joule rotorique ; $P_{ém}$: Puissance électromagnétique ; P_{fs} : Perte fer statorique ; P_{js} : Perte joule statorique ; P_a : Puissance électrique absorbée par la machine au réseau d'alimentation.

Quelque soit le couplage de la machine :

$$P_a = \sqrt{3}UI \cos \varphi ; \quad (2-19)$$

$$P_{js} = \frac{3}{2} R_s I^2 ; \quad (2-20)$$

$$P_{jr} = g P_{ém} ; \quad (2-21)$$

$$P_u = P_a - \sum \text{Pertes}. \quad (2-22)$$

Le rendement de la machine asynchrone est :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (2-23)$$

2.3 COUPLAGE DIRECT D'EOLIEN AVEC LA MACHINE ASYNCHRONE

Nous allons montrer les connexions avec la machine asynchrone, puis nous analyserons les chaînes de conversion électrique associées à ces turbines. Entre la turbine et la machine se met le multiplicateur de vitesse qui permet d'adapter la vitesse lente de rotation des pales à la vitesse rapide de la machine.

2.3.1 Connexion avec la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Fig.2.4). La machine a un nombre de paires de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important ; les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs (enclenchement au réseau).

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

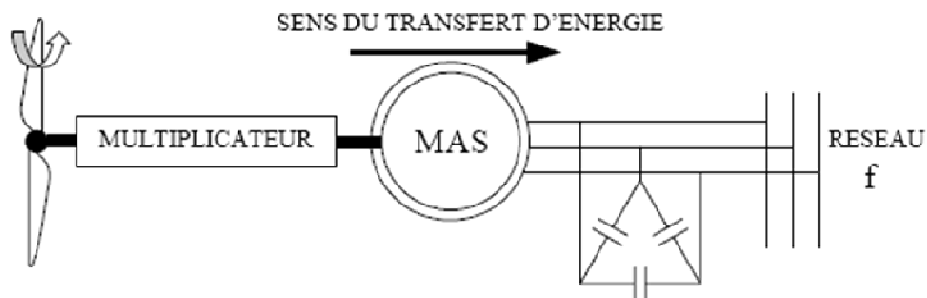


Fig. 2.4 Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

2.3.2 Connexion avec la machine asynchrone à double stator

Pour avoir un bon rendement, on doit améliorer le dispositif précédent : un stator de faible puissance, à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent ; un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées. Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents.

Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

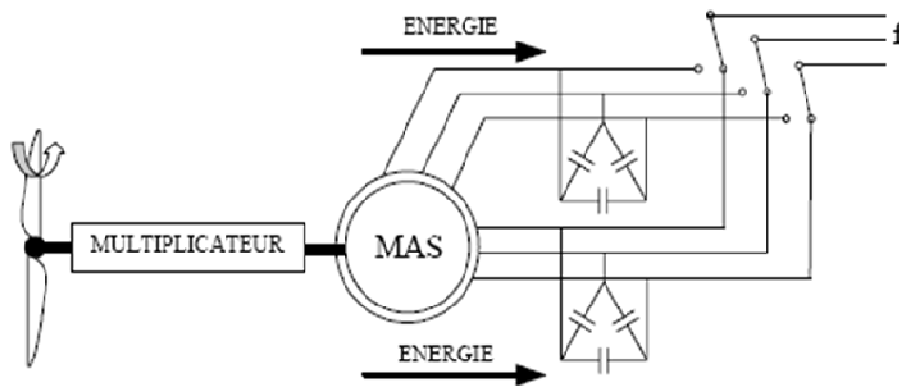


Fig.2.5 Connexion avec la machine asynchrone à double stator.

2.3.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la figure ci-dessus. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée.

De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) à base d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) dont la structure est semblable à celle de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine, et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple [4].

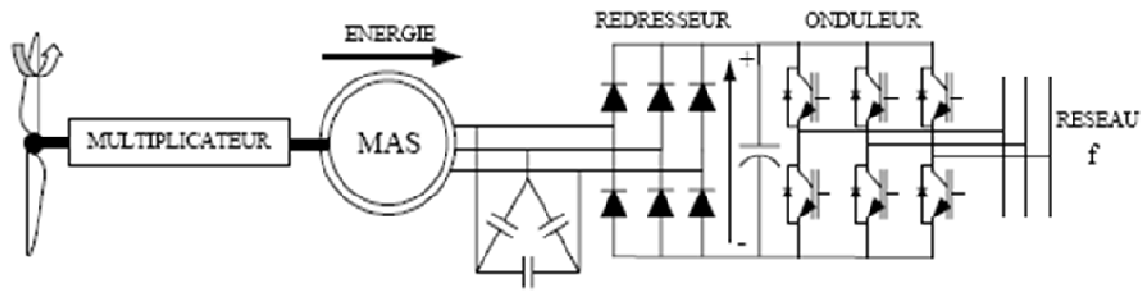


Fig. 2.6 Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur

Conclusion

Dans le cas d'une éolienne directement connectée au réseau via une machine asynchrone triphasée, le couple électromagnétique est alors quasiment proportionnel au glissement de la machine. Les éoliennes à couplage direct (vitesse fixe) ont connu un franc succès au début de la vague éolienne grâce notamment à leur robustesse et leur simplicité mécanique, mais les grandes éoliennes modernes sont à vitesse variable ce qui justifie leur connexion au réseau par l'intermédiaire des dispositifs d'électronique de puissance. Ceux-ci ne suffisent pas réellement jusqu'à présent ce que mon mémoire demande. C'est pour cela que nous allons voir, à la suite sur la modélisation d'une machine asynchrone et nous allons essayer d'établir son schéma bloc.

Chapitre 3 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

INTRODUCTION

La modélisation des machines électriques est importante aussi bien pour le concepteur que pour l'automaticien. Au niveau du concepteur, l'utilisateur aura demandé aux équations de Maxwell afin d'analyser parfaitement le comportement de la machine électrique. Dans ce chapitre, nous allons expliciter la conversion des grandeurs réelles statoriques et rotoriques en grandeurs équivalentes qui nécessite carrément l'application de transformation de Park. Cette transformation permet d'obtenir le schéma bloc de la machine pour pouvoir observer les allures de la vitesse, de la tension, du courant ainsi que le couple électromagnétique. Pour notre étude, on considère que la machine à étudier est une machine à rotor bobiné. Pour ce faire, on doit adopter des hypothèses pour faciliter l'établissement des équations de la machine.

3.1 MODELE ELECTRIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

- **Hypothèses simplificatrices**

Vue la complexité des phénomènes dans une machine asynchrone, on pose les hypothèses suivantes :

- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau ;
- La saturation de circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables ;
- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encochage est négligé ;
- La distribution des forces magnétomotrices dans l'entrefer est supposée sinusoïdale.

- **Conventions de signe**

- Les angles et les vitesses sont comptés négativement dans le sens trigonométrique ;
- Une f.é.m. positive fait circuler un courant positif ;
- Un courant positif crée à travers son propre enroulement un flux positif ;
- Le stator et le rotor sont considérés comme récepteurs.

3.1.1 Equations de tension en grandeurs de phase

Le système d'équation de tension de la machine asynchrone est obtenu par l'application de la relation fondamentale de la loi d'Ohm :

$$U = Ri + \frac{d\psi}{dt} . \quad (3-1)$$

Pour les trois phases statoriques, on résume cette écriture par l'écriture matricielle condensée :

$$[U_{abc}]_s = R_s [i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}]_s . \quad (3-2)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}_s = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}_s + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}_s . \quad (3-3)$$

Les résistances statoriques étant les mêmes pour les 3 phases, il n'y a pas lieu d'écrire une matrice de résistances.

De même pour le rotor :

$$[U_{ABC}]_r = R_r [i_{abc}]_r + \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}]_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (3-4)$$

Les tensions sont nulles car le rotor est en court-circuit.

3.1.2 Transformation des grandeurs réelles en grandeurs équivalentes de la machine asynchrone triphasée.

Ici, on transforme les enroulements orthogonaux équivalents, pour obtenir un système d'équations à coefficients constants [5]. Ainsi, les enroulements statoriques a,b ,c sont remplacés par trois enroulements ds,qs,os et les enroulements rotoriques A,B,C par dr,qr et or. Et on suppose que la pulsation ω_{axe} est comme la pulsation de l'axe de référence.

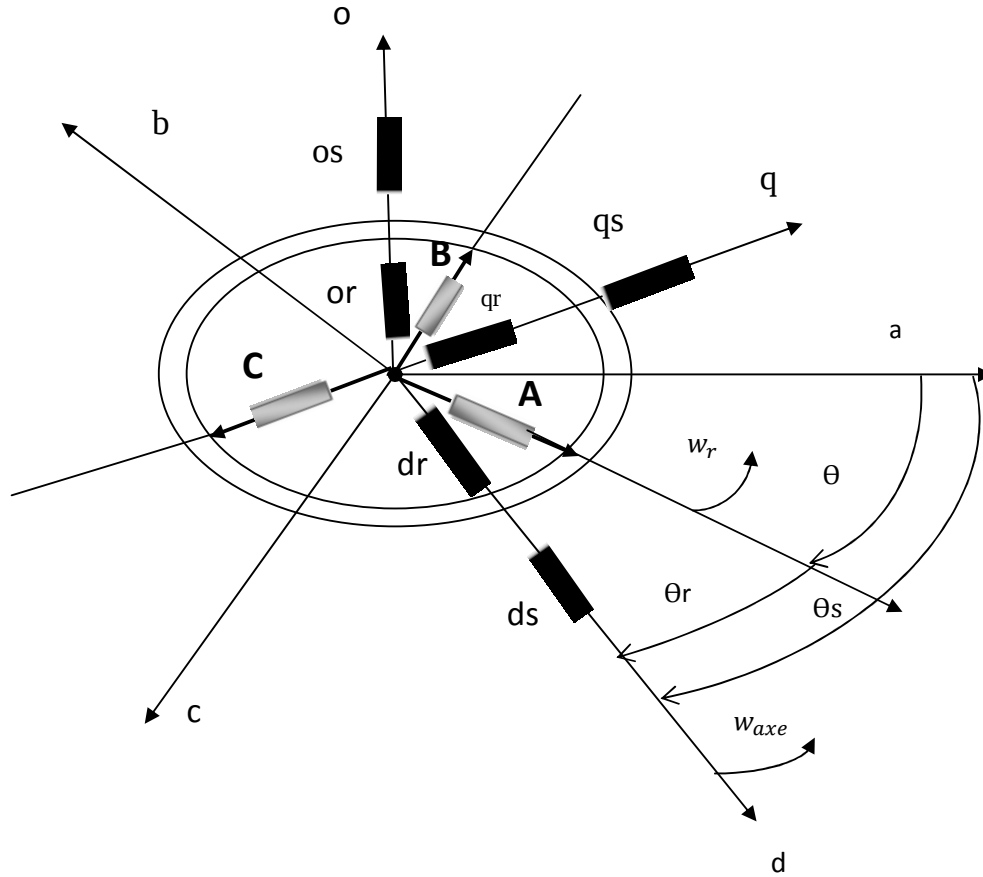


Fig. 3.1 Transformation des enroulements réels en enroulements équivalents.

Les angles sont définis et repérés de la manière suivante :

Θ : angle entre phase du stator (a) et la phase du rotor (A) ;

Θ_s : angle entre la phase du stator (a) et l'axe direct d ;

Θ_r : angle entre la phase du rotor (A) et l'axe direct d ;

ω_{axe} : désigne la vitesse angulaire électrique du système d'axes d, q, o et ω_r , celle du rotor.

$$\Theta = \Theta_0 + \omega_r t ;$$

$$\Theta_s = \Theta_{s0} + \omega_{axe} t ;$$

$$\Theta_r = \Theta_{r0} + (\omega_{axe} - \omega_r) t .$$

3.1.3 Transformation du repère triphasé au repère de Park

La transformation de Park permet de passer d'un système triphasé a,b,c au stator et A,B,C au rotor en trois enroulements d-q-o. On peut définir les trois axes d-q-o par :

d : axe direct, q : axe transversale, o : axe homopolaire ;

La matrice de passage de l'axe (a,b,c) à l'axe (d,q) s'écrit [8] :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [A] * \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} ; \quad (3-5)$$

$$\text{Avec : } [A] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \Theta & \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \Theta & -\sin \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}; \quad (3-6)$$

[A] : S'appelle la matrice de Park.

3.1.4 Transformation inverse

Comme $\det[A] \neq 0$, alors il existe l'inverse de la matrice [A] qui est le retour à un système triphasé. D'où la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [A]^{-1} * \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix}; \quad (3-7)$$

$$\text{Avec : } [A]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \Theta & -\sin \Theta & 1 \\ \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}; \quad (3-8)$$

$[A]^{-1}$: S'appelle la matrice de Park inverse.

3.1.5 Transformation des courants

- Pour le stator

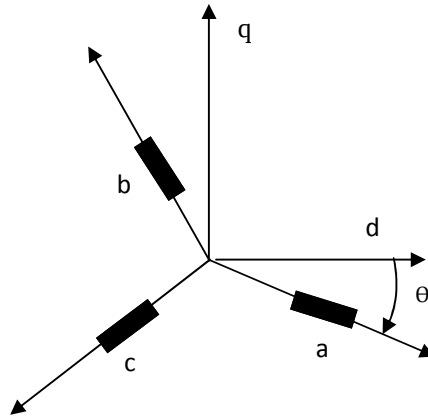


Fig.3.2 Transformation des grandeurs statoriques.

Soient N_{ds} , N_{qs} , N_{os} , et i_{ds} , i_{qs} , i_{os} respectivement les nombres de spires et les courants dans l'enroulement d-q-o. La solénation résultante du système d-q-o s'écrit :

$$(S_{res})_s = (N_{ds} i_{ds}) \mathbf{i} + (N_{qs} i_{qs}) \mathbf{j} + (N_{os} i_{os}) \mathbf{k}; \mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k} : \text{sont les vecteurs unitaires des axes d, q, o ;}$$

alors on peut trouver les expressions des courants statoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = \frac{N}{N_{ds}} \left[i_a \cos \Theta_s + i_b \cos \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_{qs} = \frac{N}{N_{qs}} \left[i_a \sin \Theta_s + i_b \sin \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \right] \\ i_{os} = \frac{N}{N_{os}} [i_a + i_b + i_c] \end{cases} \quad (3-9)$$

Pour la valeur de $\frac{N}{N_{ds}} = \frac{N}{N_{qs}} = \frac{2}{3}$; $\frac{N}{N_{os}} = \frac{1}{3}$, on écrit l'expression de la transformation des courants au stator par :

$$[i_{dqo}]_s = [A_s][i_{abc}]_s; \quad (3-10)$$

$$[i_{dqo}]_s = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \Theta & \cos \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \Theta & -\sin \left(\Theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (3-11)$$

En notant par $[A_s]$: la matrice de transformation de courant, on a :

$$[i_{dqo}]_s = [A_s][i_{abc}]_s; \quad (3-12)$$

$$\text{avec } [A_s] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \Theta_s & \cos \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \Theta_s & -\sin \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \quad (3-13)$$

On peut avoir une transformation inverse car $\det[A_s] \neq 0$.

$$[A_s]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_s & -\sin \Theta_s & 1 \\ \cos \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta_s - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\Theta_s + \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix}. \quad (3-14)$$

- Pour le rotor :

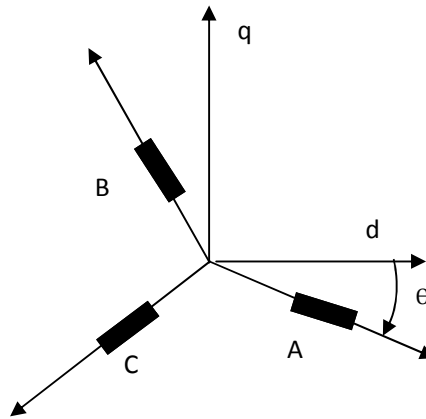


Fig.3.3 Transformation des grandeurs rotoriques.

Même raisonnement que le précédent, on trouve :

$$[i_{dqo}]_r = [A_r][i_{ABC}]_r; \quad (3-15)$$

$$[i_{dqo}]_r = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \Theta_r & \cos(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \Theta_r & -\sin(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}. \quad (3-16)$$

Comme le $\det[A_r] \neq 0$, alors il existe une matrice inverse :

$$[A_r]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \Theta_r & -\sin \Theta_r & 1 \\ \cos(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta_r - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\Theta_r + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix}; \quad (3-17)$$

$$[i_{ABC}]_r = [A_r]^{-1} [i_{dqo}]_r. \quad (3-18)$$

3.1.6 Equations des tensions

- **Au stator**

Compte tenu de la loi d'Ohm (3.1), l'équation (3.2) devient :

$$[u_{abc}]_s = R_s [i_{abc}]_s + [A_s] \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}]_s. \quad (3-19)$$

L'écriture condensée (3.3) devient alors :

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix}_s + R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}_s + [A_s] \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix}_s; \quad (3-20)$$

$$\text{avec} \begin{cases} u_a = R_s i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b = R_s i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c = R_s i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{cases}. \quad (3-21)$$

On suppose que les énergies électriques instantanées sont égales (conservées) pour la transformation de tension, elles sont données par la relation suivante :

$$(u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c) dt = (u_{qs} i_{qs} + u_{ds} i_{ds} + u_{os} i_{os}) dt; \quad (3-22)$$

$$[u_{abc}]_s^t [i_{abc}]_s = [u_{dqo}]_s^t [i_{dqo}]_s; \quad (3-23)$$

où $[u_{abc}]_s^t$: la matrice transposée de tension au stator.

$$[u_{abc}]_s^t [i_{abc}]_s = [u_{dqo}]_s^t [A_s] [i_{abc}]_s; \quad (3-24)$$

$$[u_{abc}]_s^t = [u_{dqo}]_s^t [A_s] [i_{abc}]_s; \quad (3-25)$$

$$[u_{abc}]_s = [A_s]_t^t [u_{dqo}]_s; \quad (3-26)$$

où $[A_s]_t$: la matrice de Park transposée ;

$$[u_{abc}] = [A_s]_t^{-1} [u_{abc}]_s; \quad (3-27)$$

où $[A_s]_t^{-1}$: la transposée de l'inverse de la matrice de Park.

D'après la combinaison des équations (3-19) et (3-27) ; la transformation de tension devient :

$$[u_{abc}]_s = R_s [A_s]_t^{-1} [i_{abc}]_s + [A_s]_t^{-1} \left(\frac{d}{dt} [\psi_{ABC}]_s \right); \quad (3-28)$$

$$[u_{abc}]_s = R_s [A_s]_t^{-1} [i_{abc}]_s + \frac{d}{dt} ([A_s]_t^{-1} [\psi_{abc}]_s) - \left(\frac{d}{dt} [A_s]_t^{-1} \right) [\psi_{abc}]_s; \quad (3-29)$$

$$\text{or } -\left(\frac{d}{dt}[A_s]_t^{-1}\right) [\psi_{abc}]_s = \frac{2}{3}\omega_s \begin{bmatrix} -\psi_{ds} \\ \psi_{qs} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (3-30)$$

$$\frac{d}{dt}([A_s]_t^{-1}[\psi_{abc}]_s) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ 2\frac{d\psi_{os}}{dt} \end{bmatrix}; \quad (3-31)$$

$$R_s[A_s]_t^{-1}[i_{abc}]_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} R_s i_{ds} \\ R_s i_{qs} \\ 2R_s i_{os} \end{bmatrix}; \quad (3-32)$$

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ u_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases}; \quad (3-33)$$

- Au rotor

En raisonnant de la même façon pour le stator, on a la tension de chaque phase au rotor :

$$[u_{ABC}]_r = R_r [i_{ABC}]_r + [A_r] \frac{d}{dt} [\psi_{ABC}]_r; \quad (3-34)$$

$$\begin{cases} u_A = R_r i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = R_r i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = R_r i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases}. \quad (3-35)$$

Les expressions de transformation de tension s'écrivent :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - \omega_r \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \omega_r \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \end{cases}. \quad (3-36)$$

Si on exprime ω_r en fonction de ω_s et ω_m , on trouve :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \end{cases}. \quad (3-37)$$

3.1.7 Equations des flux

Etant donné que le circuit magnétique est non saturé. On suppose que les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles entre deux enroulements sont fonction sinusoïdale de l'angle entre les axes magnétiques.

▪ Inductances statoriques

En effet, on peut écrire les inductances statoriques comme suit :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}; \quad (3-38)$$

L_{aa} : Inductance propre d'une phase statorique;

L_{ab} : Inductance mutuelle stator ;

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_{aa} - L_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & L_{aa} - L_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aa} - L_{ab} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{aa} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{aa} \end{bmatrix}; \quad (3-39)$$

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \\ L_{ab} & L_{ab} & L_{ab} \end{bmatrix}; \quad (3-40)$$

$$L_s = (L_{aa} - L_{ab}); \quad (3-41)$$

L_s : Inductance cyclique propre du stator.

▪ Inductances rotoriques

De même pour le stator mais la seule différence est le système d'enroulement A,B,C.

Ainsi, les inductances rotoriques sont données par :

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AA} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AA} \end{bmatrix}; \quad (3-42)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_{AA} - L_{AB} & 0 & 0 \\ 0 & L_{AA} - L_{AB} & 0 \\ 0 & 0 & L_{AA} - L_{AB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \end{bmatrix}; \quad (3-43)$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} L_r & 0 & 0 \\ 0 & L_r & 0 \\ 0 & 0 & L_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \\ L_{AB} & L_{AB} & L_{AB} \end{bmatrix}; \quad (3-44)$$

$$L_r = (L_{AA} - L_{AB}); \quad (3-45)$$

L_{AA} : Inductance propre d'une phase rotorique ;

L_{AB} : Inductance mutuelle entre phase rotorique ;

L_r : Inductance cyclique propre du rotor.

▪ Inductances mutuelles stator-rotor

$$[L_{sr}] = \begin{bmatrix} M_{aA} & M_{aB} & M_{aB} \\ M_{aB} & M_{aA} & M_{aB} \\ M_{aB} & M_{aB} & M_{aA} \end{bmatrix}. \quad (3-46)$$

On peut exprimer l'inductance mutuelle stator-rotor en fonction de θ :

$$[L_{sr}] = L_{aA} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}; \quad (3-47)$$

L_{aA} : Inductance mutuelle stator-rotor.

3.1.8 Transformation de flux du stator

En grandeur de phase, nous avons :

$$[\psi_{abc}]_s = [L_s][i_{abc}]_s + [L_{sr}][i_{ABC}]_r; \quad (3-48)$$

où $[L_s]$: La matrice d'inductance statorique ;

$[L_{sr}]$: La matrice des inductances mutuelles stator-rotor.

Pour transformer l'équation de flux au stator, on adopte :

$$[\psi_{dqo}]_s^t [i_{dqo}]_s = [\psi_{abc}]_s^t [i_{abc}]_s ; \quad (3-49)$$

$$[\psi_{dqo}]_s^t [A_s] [i_{abc}]_s = [\psi_{abc}]_s^t [i_{abc}]_s ; \quad (3-50)$$

$$[\psi_{dqo}]_s^t [A_s] = [\psi_{abc}]_s^t ; \quad (3-51)$$

$$[\psi_{dqo}]_s^t = [\psi_{abc}]_s^t [A_s]^{-1} ; \quad (3-52)$$

$$[\psi_{dqo}]_s = [A_s]_t^{-1} [\psi_{abc}]_s ; \quad (3-53)$$

D'où :

$$[\psi_{dqo}]_s = [A_s]_t^{-1} [L_s] [i_{abc}]_s + [A_s]_t^{-1} [L_{sr}] [i_{ABC}]_r ; \quad (3-54)$$

$$\text{Avec } [A_s]_t^{-1} [L_s] [i_{abc}]_s = \begin{bmatrix} (L_{aa} - L_{ab}) i_{ds} \\ (L_{aa} - L_{ab}) i_{qs} \\ (L_{aa} + 2L_{ab}) i_{os} \end{bmatrix} ;$$

$$[A_s]_t^{-1} [L_{sr}] [i_{ABC}]_r = \frac{3}{2} L_{aA} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} ; \quad (3-55)$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} L_{aA} \cdot i_{dr} \\ L_{aA} \cdot i_{qr} \\ 0 \end{bmatrix} . \quad (3-56)$$

En utilisant les relations trigonométriques :

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} [\cos(a+b) + \cos(a-b)] ;$$

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2} [\sin(a+b) + \sin(a-b)] ;$$

$$\theta_r = \theta_s - \theta ;$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = (L_{aa} - L_{ab}) i_{ds} + \frac{3}{2} L_{aA} \cdot i_{dr} \\ \psi_{qs} = (L_{aa} - L_{ab}) i_{qs} + \frac{3}{2} L_{aA} \cdot i_{qr} \\ \psi_{os} = (L_{aa} + 2L_{ab}) i_{os} \end{cases} . \quad (3-57)$$

En posant : $(L_{aa} - L_{ab}) = L_s ;$

$$(L_{aa} + 2L_{ab}) = L_{os} ;$$

$$\frac{3}{2} L_{aA} = L_{sr} .$$

On obtient :

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_{sr} i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_{sr} i_{qr} \\ \psi_{os} = L_{os} i_{os} \end{cases} . \quad (3-58)$$

3.1.9 Transformation de flux de rotor

En raisonnant de la même façon que la transformation de flux du stator et en changeant les indices. A proprement parler, on remplace les grandeurs rotoriques par les grandeurs statoriques et vice versa, on a :

$$[\psi_{ABC}]_r = [L_r][i_{ABC}]_r + [L_{sr}][i_{abc}]_s ; \quad (3-59)$$

On trouve :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = (L_{AA} - L_{AB})i_{dr} + \frac{3}{2}L_{aA} \cdot i_{ds} \\ \psi_{qr} = (L_{AA} - L_{AB})i_{qr} + \frac{3}{2}L_{aA} \cdot i_{qs} ; \\ \psi_{or} = (L_{AA} + 2L_{AB})i_{or} \end{cases} \quad (3-60)$$

où $L_{AA} = L_{AB} = L_{CC}$: Inductance propre d'une phase rotorique ;

$L_{AB} = L_{BA} = L_{AC}$: Inductance mutuelle rotor ;

L_{aA} : Inductance mutuelle stator-rotor.

En posant : $(L_{AA} - L_{AB}) = L_r$;

$(L_{AA} + 2L_{AB}) = L_{or}$;

$\frac{3}{2} L_{aA} = L_{sr}$.

Enfin on obtient :

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_r i_{dr} + L_{sr} i_{ds} \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} + L_{sr} i_{qs} . \\ \psi_{or} = L_{or} i_{or} \end{cases} \quad (3-61)$$

3.1.10 Equations de Park de la machine asynchrone exprimée dans les différents référentiels [5].

a) Référentiel lié au stator

On a : $\theta_s = C^{te} \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = 0$; $\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$.

Les équations des tensions au stator s'écrivent :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} . \\ u_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (3-62)$$

Ainsi, pour le rotor :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \omega_m \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} - \omega_r \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} . \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (3-63)$$

b) Référentiel lié au rotor

On a : $\theta_r = C^{te} \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r = 0$; $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$.

Les équations des tensions au stator s'écrivent :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} . \\ u_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (3-64)$$

Alors pour le rotor :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (3-65)$$

c) Référentiel lié au champ tournant

On admet les relations suivantes :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r ; \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s .$$

On obtient les équations pour le stator :

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_s \psi_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \psi_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} \\ u_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\psi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (3-66)$$

Alors pour le rotor, on a :

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} - (\omega_s - \omega_m) \psi_{qr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + (\omega_s - \omega_m) \psi_{dr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} \\ u_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\psi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (3-67)$$

3.1.11 Equation du couple électromagnétique

La puissance électrique statorique instantanée de la machine asynchrone s'écrit :

$$P(t) = U_a i_a + U_b i_b + U_c i_c = \frac{3}{2} (u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs}) + 3 u_{os} i_{os} . \quad (3-68)$$

En remplaçant u_{ds} , u_{qs} , u_{os} par leurs valeurs d'après la loi d'Ohm $U=Ri$, l'énergie électrique absorbée par la machine est :

$$P(t)dt = dW_s ;$$

$$dW_s = \frac{3}{2} [(R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2) + 3(R_s i_{os}^2))]dt + [(d\psi_{ds} i_{ds} + d\psi_{qs} i_{qs}) + 3d\psi_{os} i_{os}] + [\omega_s (\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds})]dt . \quad (3-69)$$

On voit que l'énergie électrique est composée de trois termes :

- L'énergie perdue par effet joule au stator ;
- La variation d'énergie magnétique statorique ;
- L'énergie dW_s transférée du stator à travers de l'entrefer par l'intermédiaire du champ tournant.

En effet :

$$C_{em} = \frac{dw_s}{\Omega_s dt} ; \quad (3-70)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\Omega_s} [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] = \frac{3}{2} p [\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}] ; \quad (3-71)$$

$$\text{avec } p = \frac{\omega_s}{\Omega_s} ;$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_{sr}}{L_r} [\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}] ; \quad (3-72)$$

p : Nombre de paire de pôle de la machine ;

L_{sr} : Matrice des inductances mutuelles stator-rotor.

3.2 ETABLISSEMENT DU SCHEMA BLOC DE LA MACHINE ASYNCHRONE

3.2.1 Equations des flux

Le coefficient de dispersion σ s'exprime de la manière suivante :

$$\sigma = 1 - \frac{L_{sr}^2}{L_r L_s}. \quad (3-73)$$

$$\text{D'où : } \sigma L_s = L_s - \frac{L_{sr}^2}{L_r}. \quad (3-74)$$

D'après les expressions obtenues dans l'équation (3-58) et (3-61), à partir de ψ_{dr} et ψ_{qs} , on tire les valeurs de i_{dr} et i_{qr} :

$$i_{dr} = \frac{1}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_{sr}}{L_r} i_{ds} ; \quad (3-75)$$

$$i_{qr} = \frac{1}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_{sr}}{L_r} i_{qs}. \quad (3-76)$$

On introduit (3-75) et (3-76) dans les expressions de ψ_{ds} et ψ_{qs} , on trouve :

$$\psi_{ds} = \left(L_s - \frac{L_{sr}^2}{L_r} \right) i_{ds} + \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{dr} ; \quad (3-77)$$

$$\psi_{qs} = \left(L_s - \frac{L_{sr}^2}{L_r} \right) i_{qs} + \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{qr}. \quad (3-78)$$

En remplaçant $L_s - \frac{L_{sr}^2}{L_r}$ par σL_s dans (3-77) et (3-78), on a :

$$\psi_{ds} = \sigma L_s i_{ds} + \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{dr} ; \quad (3-79)$$

$$\psi_{qs} = \sigma L_s i_{qs} + \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{qr}. \quad (3-80)$$

3.2.2 Equations des tensions

Comme le rotor est en court-circuit, donc :

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr}; \quad (3-81)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr}. \quad (3-82)$$

On introduit (3-75) et (3-76) dans (3-81) et (3-82), on trouve :

$$0 = R_r \left(\frac{1}{L_r} \psi_{dr} - \frac{L_{sr}}{L_r} i_{ds} \right) + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr}; \quad (3-83)$$

$$0 = R_r \left(\frac{1}{L_r} \psi_{qr} - \frac{L_{sr}}{L_r} i_{qs} \right) + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr}. \quad (3-84)$$

En remplaçant $\frac{L_r}{R_r}$ par τ_r les équations (3-83) et (3-84) deviennent :

$$0 = \frac{1}{\tau_r} \psi_{dr} - \frac{L_{sr}}{\tau_r} i_{ds} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr}; \quad (3-85)$$

$$0 = \frac{1}{\tau_r} \psi_{qr} - \frac{L_{sr}}{\tau_r} i_{qs} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr}. \quad (3-86)$$

En introduisant (3-79) et (3-80) dans les équations de tension (3-33), on obtient :

$$u_{ds} = R_s i_{ds} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{ds} + \frac{L_{sr}}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{dr} - \omega_s \sigma L_s i_{qs} - \omega_s \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{qr} ; \quad (3-87)$$

$$u_{qs} = R_s i_{qs} + \sigma L_s \frac{d}{dt} i_{qs} + \frac{L_{sr}}{L_r} \frac{d}{dt} \psi_{qr} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{dr} . \quad (3-88)$$

3.2.3 Les transformations de Laplace utilisées dans le schéma bloc de la machine

La transformation de Laplace des expressions (3-85) et (3-86), en supposant qu'à l'instant

$t = 0$; $\psi_{dr} = \psi_{qr} = i_{ds} = i_{qs} = 0$ nous donne :

$$0 = \frac{1}{\tau_r} \psi_{dr} - \frac{L_{sr}}{\tau_r} i_{ds} + s \psi_{dr} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr} ; \quad (3-89)$$

$$0 = \frac{1}{\tau_r} \psi_{dr} - \frac{L_{sr}}{\tau_r} i_{qs} + s \psi_{dr} - (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr} . \quad (3-90)$$

En multipliant par τ_r , les deux membres des équations (3-89) et (3-90), on a :

$$0 = (1 + s \tau_r) \psi_{dr} - L_{sr} i_{ds} - \tau_r (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr} ; \quad (3-91)$$

$$0 = (1 + s \tau_r) \psi_{qr} - L_{sr} i_{qs} - \tau_r (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr} . \quad (3-92)$$

Ainsi on a :

$$(1 + s \tau_r) \psi_{dr} = L_{sr} i_{ds} - \tau_r (\omega_r - \omega_m) \psi_{qr} ; \quad (3-93)$$

$$(1 + s \tau_r) \psi_{qr} = L_{sr} i_{qs} - \tau_r (\omega_r - \omega_m) \psi_{dr} . \quad (3-94)$$

On pose $\omega'_r = \omega_r - \omega_m$.

En divisant par $(1 + \tau_r s)$, les deux membres des équations (3-93) et (3-94), on a :

$$\psi_{dr} = \frac{1}{1 + s \tau_r} [L_{sr} i_{ds} + \tau_r \omega'_r \psi_{qr}] ; \quad (3-95)$$

$$\psi_{qr} = \frac{1}{1 + s \tau_r} [L_{sr} i_{qs} + \tau_r \omega'_r \psi_{dr}] . \quad (3-96)$$

La transformation de Laplace des expressions (3-87) et (3-88) en supposant qu'à l'instant $t = 0$; $\psi_{dr} = \psi_{qr} = i_{ds} = i_{qs} = 0$ nous donne :

On peut tirer :

$$i_{ds} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \left[u_{ds} - \frac{L_{sr}}{L_r} s \psi_{dr} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} + \omega_s \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{qr} \right] . \quad (3-97)$$

De la même manière que précédemment, on aboutit :

$$i_{qs} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \left[u_{qs} - \frac{L_{sr}}{L_r} s \psi_{qr} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{L_{sr}}{L_r} \psi_{dr} \right] . \quad (3-98)$$

La transformation de Laplace de l'équation de mouvement (2-8) nous donne :

$$C_{em} - C_r = J s \Omega_s . \quad (3-99)$$

$$\text{D'où : } \Omega_s = \frac{1}{J s} (C_{em} - C_r) . \quad (3-100)$$

avec : $\omega_r = p \Omega_s$.

En adoptant $L_{sr} = M$, voici les équations que nous permet de concevoir le schéma bloc de la machine asynchrone.

$$\psi_{dr} = \frac{1}{1 + s \tau_r} [M i_{ds} + \tau_r \omega'_r \psi_{qr}] ; \quad (3-101)$$

$$\psi_{qr} = \frac{1}{1 + s \tau_r} [M i_{qs} + \tau_r \omega'_r \psi_{dr}] ; \quad (3-102)$$

$$i_{ds} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \left[u_{ds} - \frac{M}{L_r} s \psi_{dr} + \omega_s \sigma L_s i_{qs} + \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{qr} \right] ; \quad (3-103)$$

$$i_{qs} = \frac{1}{R_s + \sigma L_s s} \left[u_{qs} - \frac{M}{L_r} s \psi_{qr} + \omega_s \sigma L_s i_{ds} + \omega_s \frac{M}{L_r} \psi_{dr} \right] ; \quad (3-104)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{M}{L_r} [\psi_{dr} i_{qs} - \psi_{qr} i_{ds}] ; \quad (3-105)$$

$$\Omega_s = \frac{1}{j_s} (C_{em} - C_r) ;$$

$$\omega_r = p \Omega_s ;$$

$$\omega'_r = \omega_r - \omega_m .$$

3.2.4 Schéma bloc de la machine asynchrone

3.2.4.1 Modèle du bloc de transformation de Park

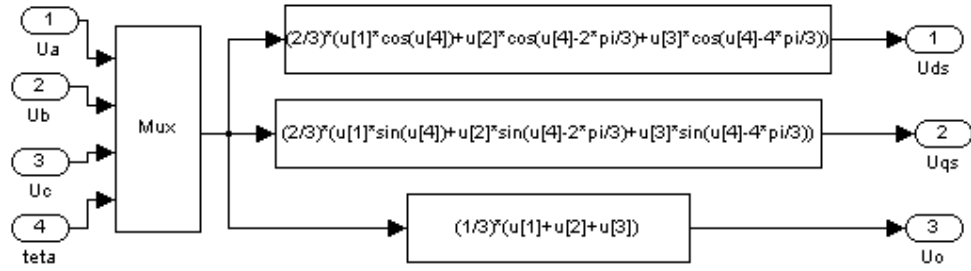


Fig. 3.4 Développement du bloc de transformation direct de Park.

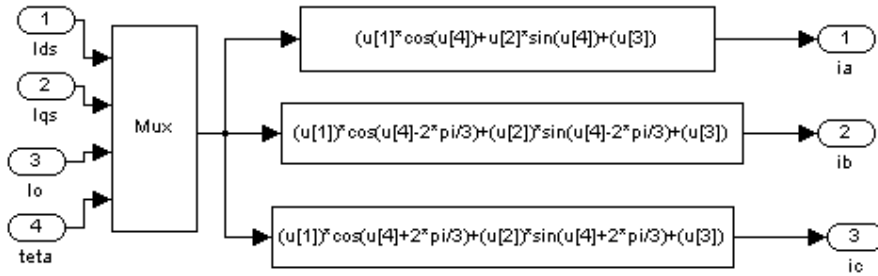


Fig. 3.5 Développement du bloc de transformation inverse de Park.

3.2.4.2 Modèle de la machine asynchrone

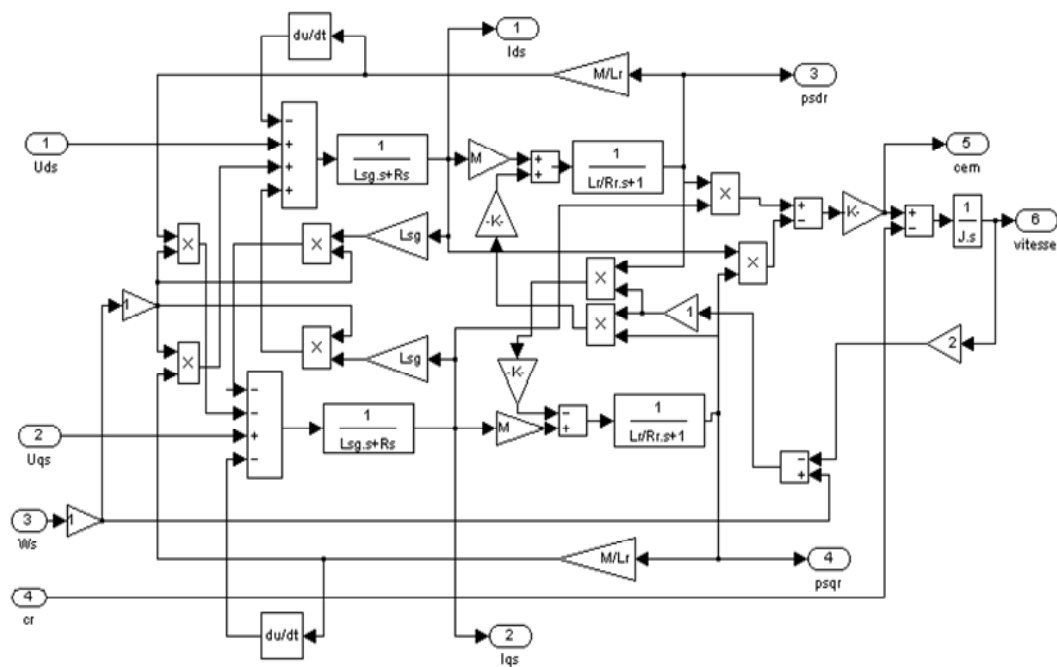


Fig.3.6 Schéma bloc de la machine asynchrone.

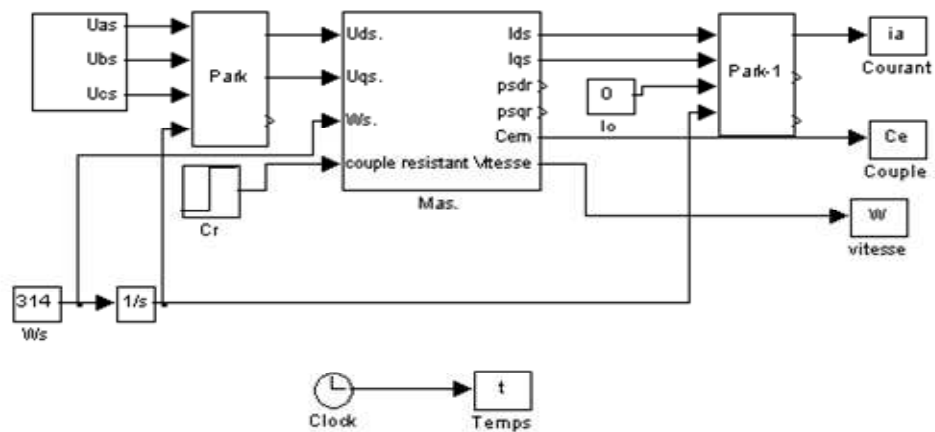


Fig. 3.7 Schéma bloc de l'ensemble.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons pu établir un modèle mathématique de la machine asynchrone triphasée dont la complexité est réduite en utilisant certain nombre d'hypothèses simplificatrices. L'application de la transformation de Park permet de passer du système triphasée (a,b,c) vers le système (d,q,o) de Park.

L'utilisation de la transformation de Park et les diverses équations de Laplace nous a permis de construire le schéma bloc de la machine. La source triphasée est insérée dans le bloc de l'ensemble qui est décalée de $\frac{2\pi}{3}$. Les résultats de la simulation seront présentés au chapitre suivant. Nous allons aussi étudier la turbine à vent et on associe avec la génératrice asynchrone.

Chapitre 4 : MODELISATION DE L'EOLIENNE ET SIMULATION

INTRODUCTION

D'après ce que nous avons élaboré dans le chapitre précédent, le schéma bloc de la machine est utilisé pour visualiser les courbes. Avant que nous fassions la simulation, nous allons commencer par modéliser le vent et la turbine. Le vent est l'élément le plus important pour l'aérogénérateur car l'énergie cinétique contenue dans le vent est récupérée en partie, et transformée en énergie mécanique par le biais de la turbine, puis en énergie électrique grâce au générateur. L'appareil le plus répandu pour mesurer la vitesse du vent est l'anémomètre à coupelles ou le moulinet. Pour pouvoir mener cette étude, nous allons utiliser le Matlab/Simulink comme outils de recherche. A partir des courbes, nous interpréterons les résultats obtenus.

4.1 MODELE DU VENT

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. Il est une grandeur stochastique même si certaines de ces caractéristiques sont déterministes. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Néanmoins, la direction du vecteur de vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de la voilure éolienne car elle n'est pas vue par sa surface active. Par simplification, le vecteur- vitesse évolue dans le plan horizontal. Les voilures à axe vertical sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active est toujours en face du vent), alors le modèle du vent comportemental est simplifié considérablement. On ne peut pas le représenter des expressions exclusivement déterminées.

4.1.1 Expressions de la vitesse du vent

Il existe plusieurs modes de reproduction des variations de la vitesse du vent [2] :

La vitesse du vent peut être modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps

$$V_v = f(t). \quad (4-1)$$

La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_t = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot w_v \cdot t)). \quad (4-2)$$

La vitesse du vent en un point $v_o(t)$ peut être décomposée en une composante moyenne $v(t)$ (lentement variable), et une composante variable représentant les fluctuations $v_1(t)$. D'où l'équation de cette vitesse :

$$v_o(t) = v(t) + v_1(t). \quad (4-3)$$

La composante représentant la turbulence $v_1(t)$ est caractérisée par l'échelle de longueur L_v et l'écart type σ_v de cette turbulence.

La définition de la composante turbulence se fait en deux étapes :

Première étape : Formule de Von Karman :

$$\varphi_v = \frac{K_v(\dot{m}_1 \cdot T_v \cdot S + 1)}{(1 + T_v \cdot S)(1 + \dot{m}_2 T_v \cdot S)} ; \quad (4-4)$$

avec $\dot{m}_1 = 0,4$ et $\dot{m}_2 = 0,25$: débit massique du vent à travers l'éolienne.

K_v et T_v : sont des paramètres mathématiques. Ils sont fonctions de l'échelle de longueur de la turbulence et s est la variable de Laplace.

Deuxième étape : Définition de l'écart type de la turbulence σ_v .

L'écart type dépend de la vitesse moyenne V et d'un coefficient K_v qui représente l'intensité de la turbulence :

$$\sigma_v = K_v \cdot V. \quad (4-5)$$

Le vent a trois paramètres :

- une vitesse moyenne V ;
- un coefficient de variance K_σ (compris entre 0.1 en mer et 0.25 dans la zone turbulence) ;
- une échelle de longueur de turbulence L_v (compris entre 100 en mer et 500 dans la zone turbulence).

A partir de bruit blanc gaussien à l'entrée, il est possible de déterminer la composante de turbulence et donc de générer une série temporelle de la vitesse du vent en un point $V_o(t)$.

4.1.2 Composantes de la vitesse du vent

La vitesse du vent fait apparaître deux composantes : une composante lente correspondant à la vitesse du vent, et une composante rapide dite turbulence. Elles sont représentées par les figures suivantes :

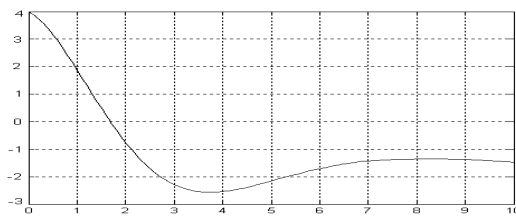


Fig. 4.1 Composante lente.

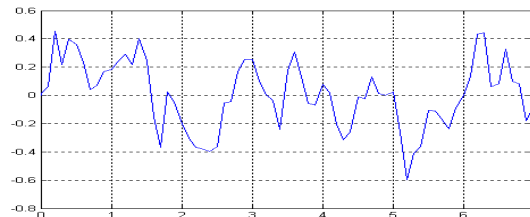


Fig. 4.2 Composante de turbulence.

4.2 ETUDE AERODYNAMIQUE DU PROFIL DES PALES

4.2.1 Notion sur la théorie de l'aile portance

Il s'agit de modéliser les forces et les moments agissant sur une section de pale. La force de portance L est donnée par l'expression [3] :

$$L = \frac{\rho c}{2} V_r^2 c_L ; \quad (4-6)$$

V_r : la vitesse relative du vent ou vitesse du vent incident sur l'élément de pale ;

c : la longueur de la corde du profil ; ρ : la densité de l'air ; c_L : le Coefficient de portance.

La force de traînée a pour expression :

$$D = \frac{\rho c}{2} V_r^2 c_D; \quad (4-7)$$

où c_D est le coefficient de traînée.

4.2.2 Action aérodynamique sur l'élément de pale

Les pales d'une éolienne sont fixées sur un arbre servant d'axe de rotor. L'arbre est parallèle à la direction du vent lorsque l'éolienne tourne. Le plan de rotation des pales est donc perpendiculaire à la direction du vent.

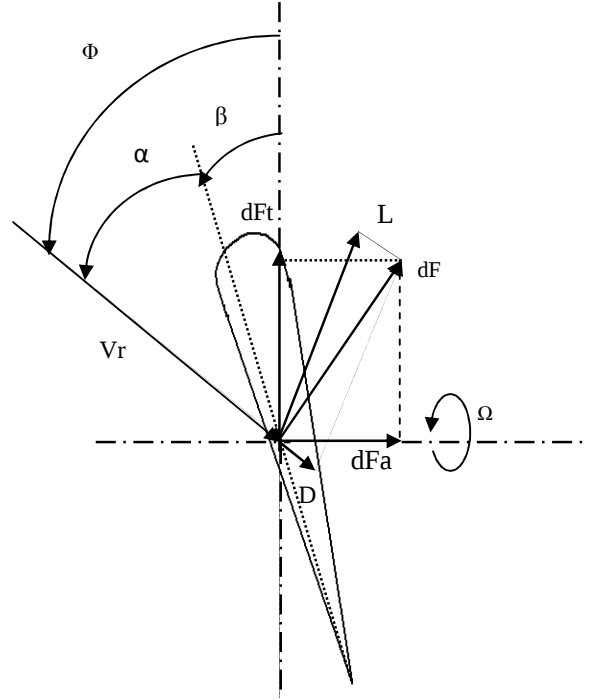


Fig. 4.3 Forces des poussées axiales et tangentielles agissant sur l'élément de pale.

Les coefficients de portance et de traînée dépendent de l'angle d'attaque α (fonction de l'angle d'incidence Φ du vent sur le rotor et l'angle de calage β de la pale) et du type de profil de la pale. A partir des expressions de la portance et de la traînée, on calcule les fonctions de poussées axiales dF_a et tangentielles dF_t agissant sur un élément de pale.

$$dF_a = \frac{\rho c}{2} V_r^2 (C_L(\alpha) \cos(\Phi) + C_D(\alpha) \sin(\Phi)); \quad (4-8)$$

$$dF_t = \frac{\rho c}{2} V_r^2 (C_L(\alpha) \sin(\Phi) - C_D(\alpha) \cos(\Phi)). \quad (4-9)$$

La somme des intégrales sur toutes les pales des composantes horizontales et verticales, des forces de portance et de traînée, permet le calcul de la force de poussée axiale et du couple aérodynamique (couple capté par la turbine). Ces expressions sont données par les deux formules suivantes [3]:

$$F_a = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R dF_a(r) dr; \quad (4-10)$$

$$F_t = \sum_{k=1}^{N_p} \int_{R_m}^R r dF_t(r) dr. \quad (4-11)$$

avec N_p : le nombre de pales ;

R : le rayon de l'aéroturbine ;

R_m : la distance du centre du moyeu au coin de la pale ;

r : la partie élémentaire de la pale.

La force axiale est nécessaire pour calculer les efforts subis par les pales et la tour. D'après les équations établies précédemment, le couple aérodynamique dépend du module de la vitesse du vent, de l'angle d'incidence Φ et de l'angle d'attaque α . L'étude de ces efforts et de la tour sont purement mécaniques, ne font néanmoins pas des objectifs de ce mémoire.

4.3 MODELISATION DE LA TURBINE

Le modèle de la turbine doit, lorsqu'elle est soumise à un vent v , créer un couple T qui aura pour conséquence de faire tourner l'arbre mécanique sur lequel elle est fixée. Il existe des modèles de turbine relativement complexes, prenant en compte l'effet de mât, de la pesanteur sur la rotation des pales, de leur élasticité ou encore de la variation de la vitesse du vent selon l'altitude. Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'études électromagnétiques sont relativement simplifiés. Cependant, ils permettent des temps de simulation relativement courts .

4.3.1 Puissance mécanique de la turbine

La puissance mécanique de la turbine est donnée par la formule suivante :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 C_p ; \quad (4-12)$$

avec $S = \pi R^2$: la surface balayée par les pales de la turbine ;

En remplaçant S par sa valeur dans l'équation (4-12), on obtient :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p . \quad (4-13)$$

La valeur maximale théorique de C_p est donnée par la démonstration de la formule de Betz [3].

$$C_p = 0,593. \quad (4-14)$$

4.3.2 Caractéristique de coefficient de puissance en fonction de l'angle de calage β et la vitesse spécifique λ

La turbine est caractérisée par le modèle du vent et le coefficient de puissance. Il est relativement complexe de trouver les informations sur la partie mécanique et électrique des éoliennes, mais nous allons essayer de tracer quelques courbes de C_p , dont la formule est claire dans le schéma bloc de la turbine (Fig.4.5) [8].

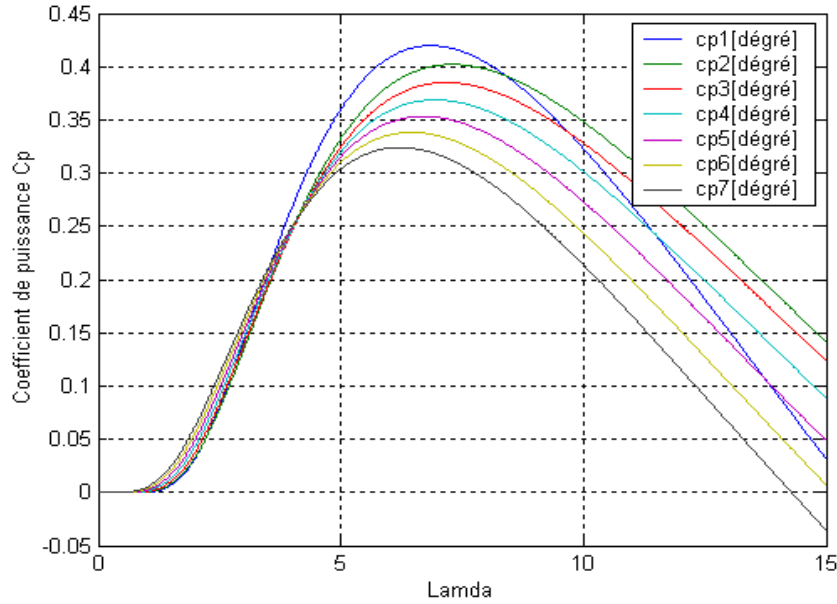


Fig.4.4 Caractéristique de C_p en fonction de β et λ simulé en matlab.

4.3.3 Couple mécanique de la turbine

Le couple mécanique est le rapport entre la puissance mécanique et la vitesse de rotation de la turbine.

$$T_{mt} = \frac{P_{mt}}{\Omega} ; \quad (4-15)$$

$$T_{mt} = \frac{1}{2\Omega} \rho \pi R^2 V_v^3 C_p ; \quad (4-16)$$

On sait que : $\lambda = \frac{R\Omega}{V_v}$

En fonction de la vitesse spécifique λ , le couple mécanique s'écrit :

$$T_{mt} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V_v^2 C_p . \quad (4-17)$$

4.3.4 Schéma bloc de la turbine

Les expressions de la puissance et du couple mécanique permettent de concevoir le schéma bloc de la turbine. Il est difficile de modéliser le vent. Mais on peut supposer le vent comme somme de fonction sinusoïdale (4-2). Pour la simulation, le rayon de la turbine $R=5$ [m] et l'angle de calage $\beta=30^\circ$.

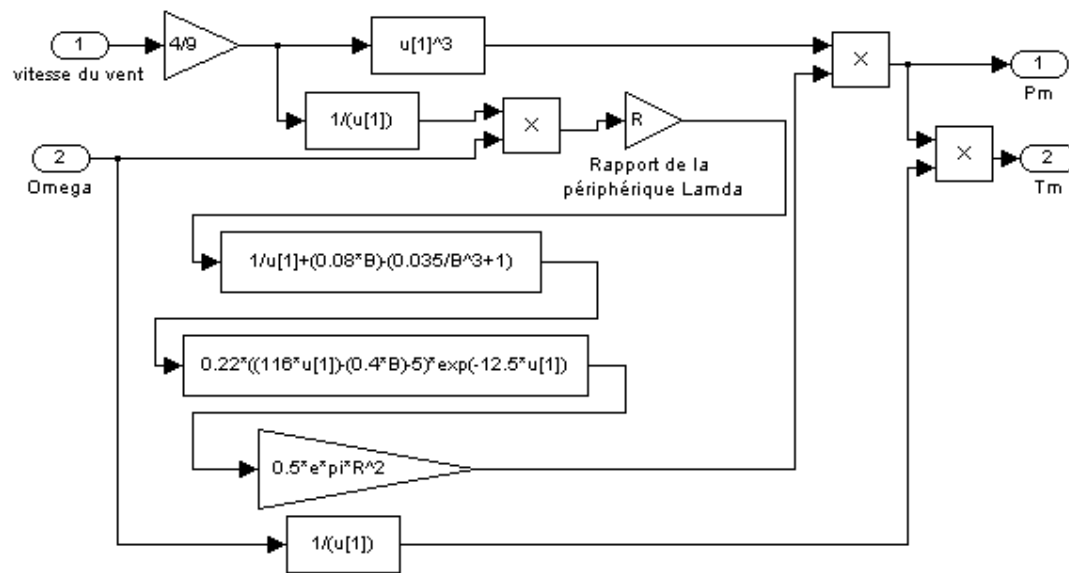


Fig.4.5 Schéma de la turbine à vent.

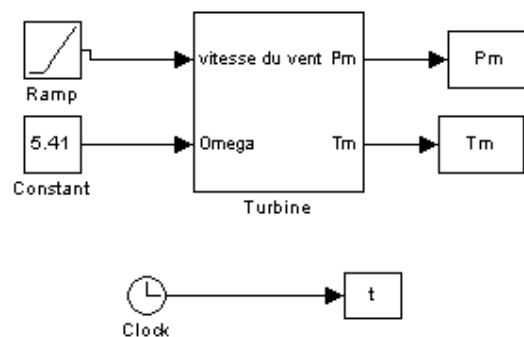


Fig.4.6 Schéma bloc de la simulation.

Après avoir simulé le schéma bloc de la turbine ci-dessus, voici les deux courbes de la puissance mécanique et du couple mécanique de la turbine à vent en fonction de l'angle de calage ou l'angle d'attaque β .

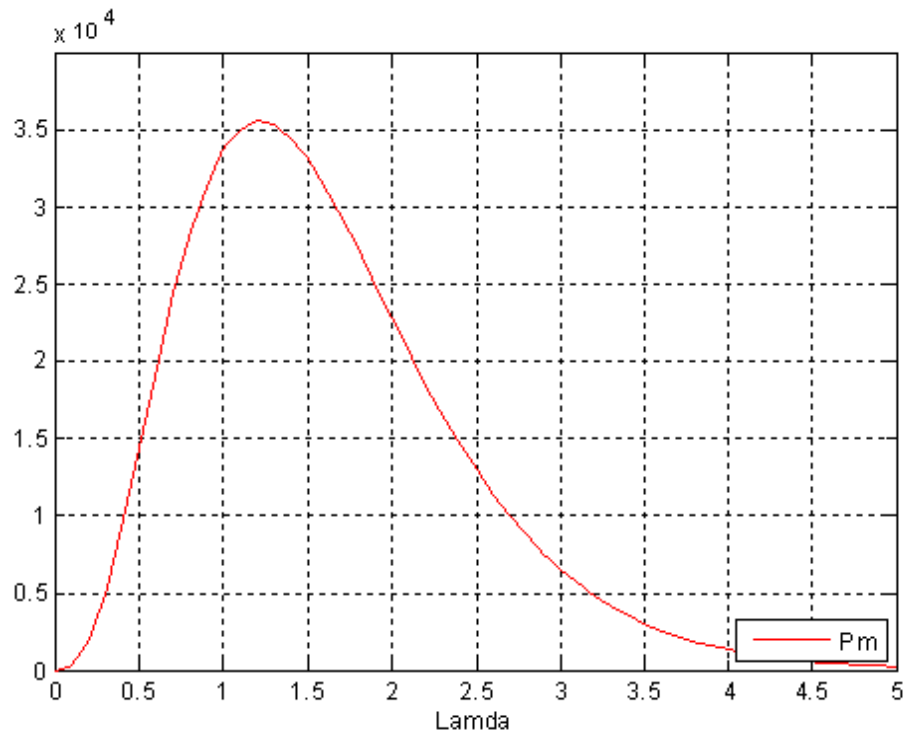


Fig.4.7 Courbe de la puissance mécanique.

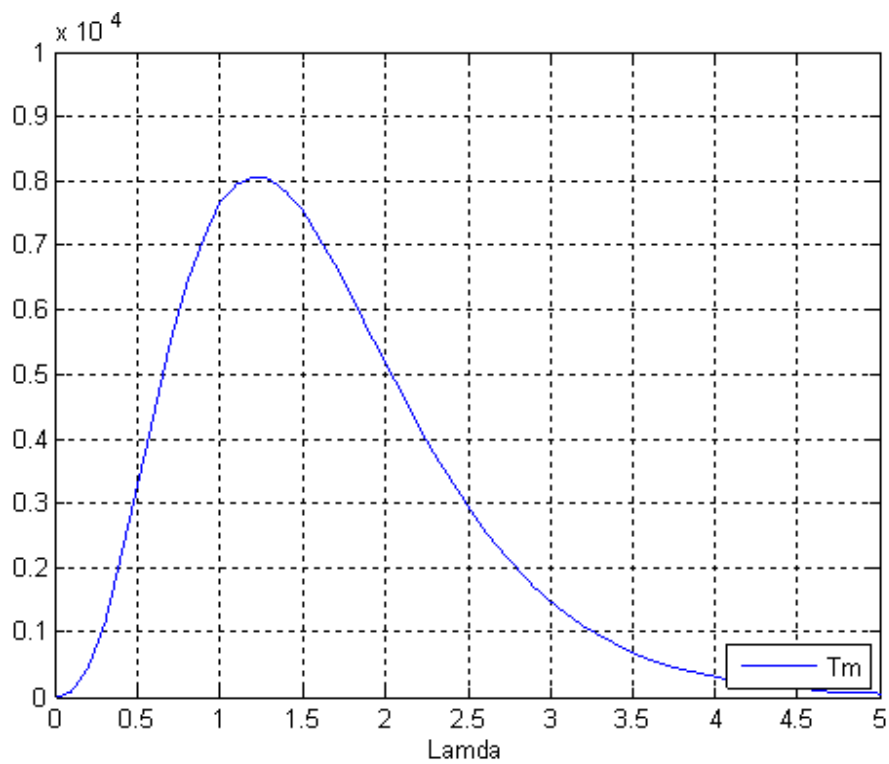


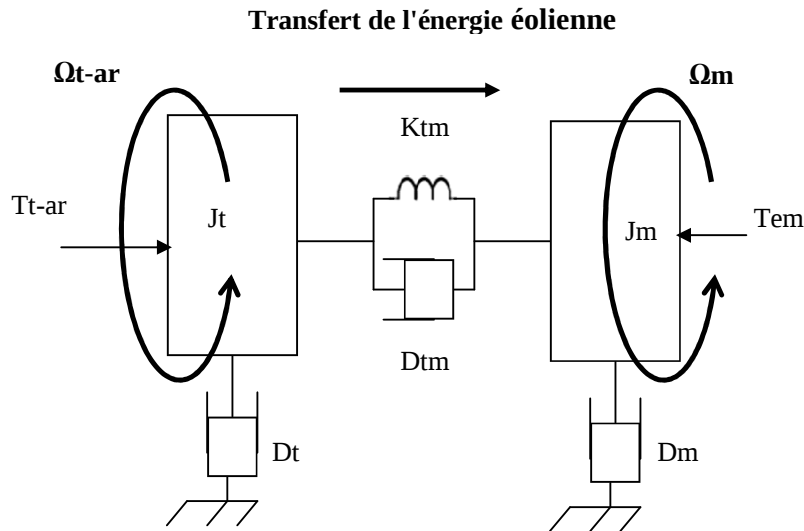
Fig.4.8 Courbe du couple mécanique.**4.3.5 Couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine**

La modélisation de la transmission de l'énergie entre la machine et la turbine est complexe. Ce que nous allons modéliser ici, est le cas de système à deux masses.

Toutes les grandeurs sont ramenées à l'axe de grande vitesse. L'inertie J_t se rapporte aux masses du côté de la turbine tandis que J_m désigne les masses du côté de la machine électrique. En fait, ces deux inerties ne représentent pas forcément l'aéroturbine et la machine électrique. Si la fréquence de résonance fondamentale du train de puissance vient des pales, alors une partie de l'inertie de l'aéroturbine est représentée dans J_m .

Le couplage flexible entre les inerties J_t et J_m est défini par les coefficients de rigidité et l'amortissement K_m et D_m . Comme pour les inerties, ces paramètres ne sont pas directement liés à l'axe rapide. La résonance fondamentale est donnée par la composante la plus flexible du train de puissance et celle-ci peut, par exemple, être la flexion des pales dans la direction longitudinale des pales.

Les coefficients de frottement D_t et D_m représentent les pertes mécaniques par frottement dans le mouvement de rotation de tous les éléments. Tous ces paramètres ne sont pas directement liés à l'ensemble des éléments du train de puissance, mais à ce modèle à deux masses, qui s'exprime le mode principal du comportement dynamique du train de puissance [3].

**Fig.4.9 Couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique.**

Toutes les variables du côté de la machine sont ramenées à l'axe rapide, donc on obtient :

$$\Omega_{t_ar} = N\Omega_t \text{ et } T_{t_ar} = \frac{T_t}{N} ; \text{ avec } N \text{ est le rapport de multiplication de vitesse.} \quad (4-18)$$

Le couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique est ainsi modélisé par trois équations différentielles linéaires suivantes :

$$J_t \frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} = T_{t_ar} - D_t \Omega_{t_ar} - T_{mec}; \quad (4-19)$$

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{em} - D_m \Omega_m - T_{mec}; \quad (4-20)$$

$$\frac{dT_{mec}}{dt} = K_m (\Omega_{t_ar} - \Omega_m) + D_m \left(\frac{d\Omega_{t_ar}}{dt} - \frac{d\Omega_m}{dt} \right); \quad (4-21)$$

K_m : Coefficient de rigidité ;

D_m : Coefficient d'amortissement.

4.4 RESULTATS DE LA SIMULATION

4.4.1 Résultats de la simulation de la machine asynchrone

La figure ci-dessous montre les résultats de la simulation de démarrage à vide du moteur asynchrone. Ces trois courbes représentent respectivement l'allure de courant statorique, le couple électromagnétique et la vitesse de la machine asynchrone. Voir dans l'annexe les paramètres utilisés pour la simulation.

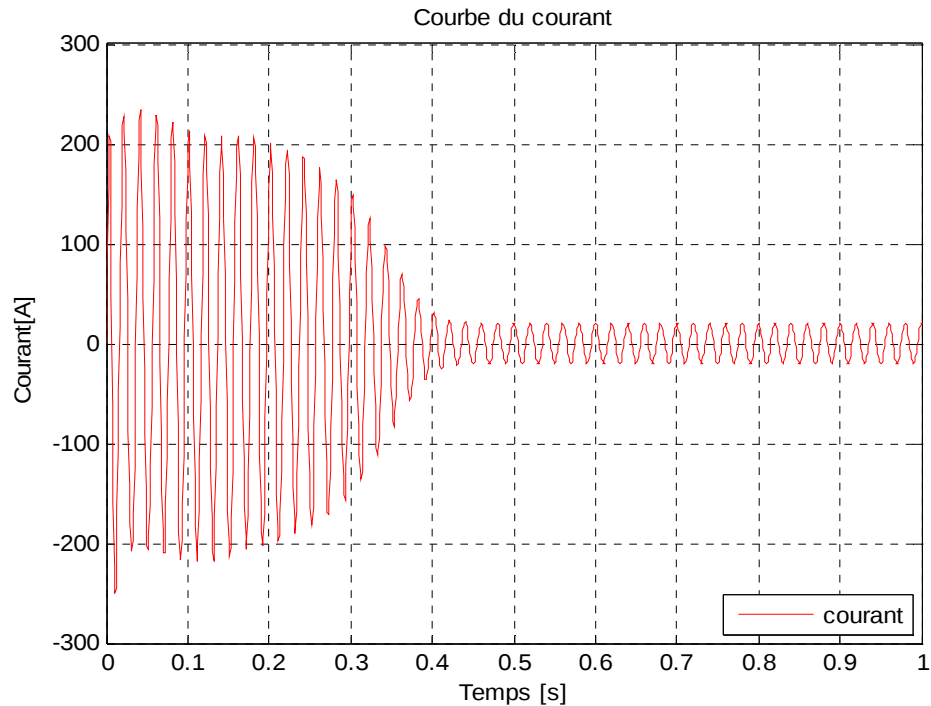


Fig.4.10 Courbe du courant statorique.

D'après ce courbe, le courant statorique est très élevé cela signifie que lors de démarrage direct la machine fait appel de courant important au réseau environ $I_D = 5 \text{ à } 10 I_N$ (I_D : courant de démarrage direct, I_N : courant nominal) [7]. A $t = 0.4[s]$ la machine atteint son régime de fonctionnement nominal et le courant reste stable.

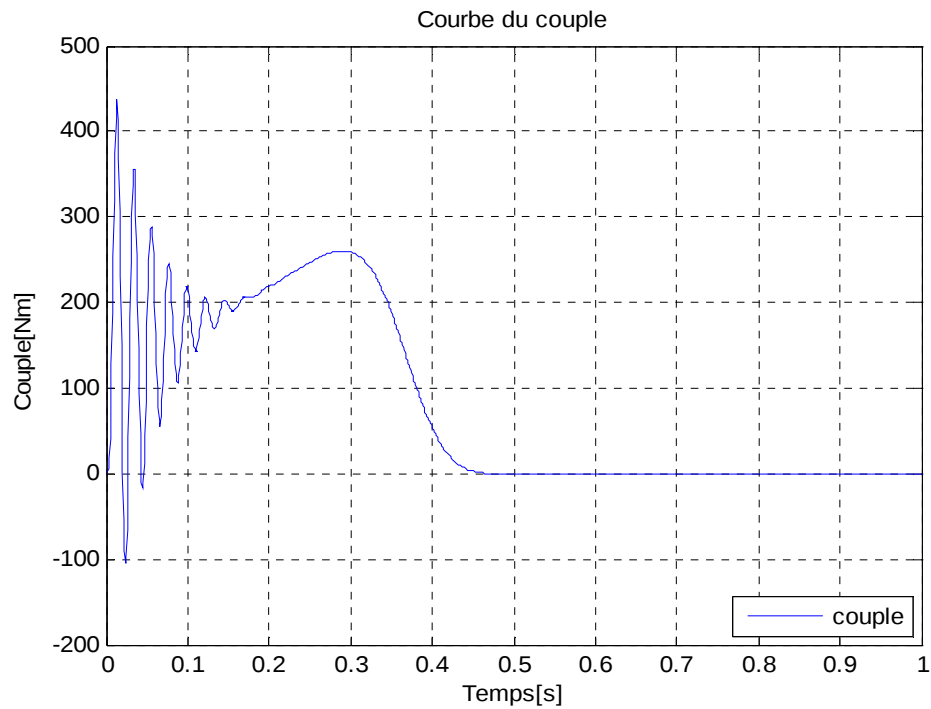


Fig.4.11 Courbe du couple électromagnétique.

Au démarrage (à $t=0[s]$) ; le couple est très élevé cela veut dire que lors de démarrage direct la machine démarre brusquement et développe un couple oscillant important .A $t=0.45[s]$ machine atteint son régime de fonctionnement nominal.

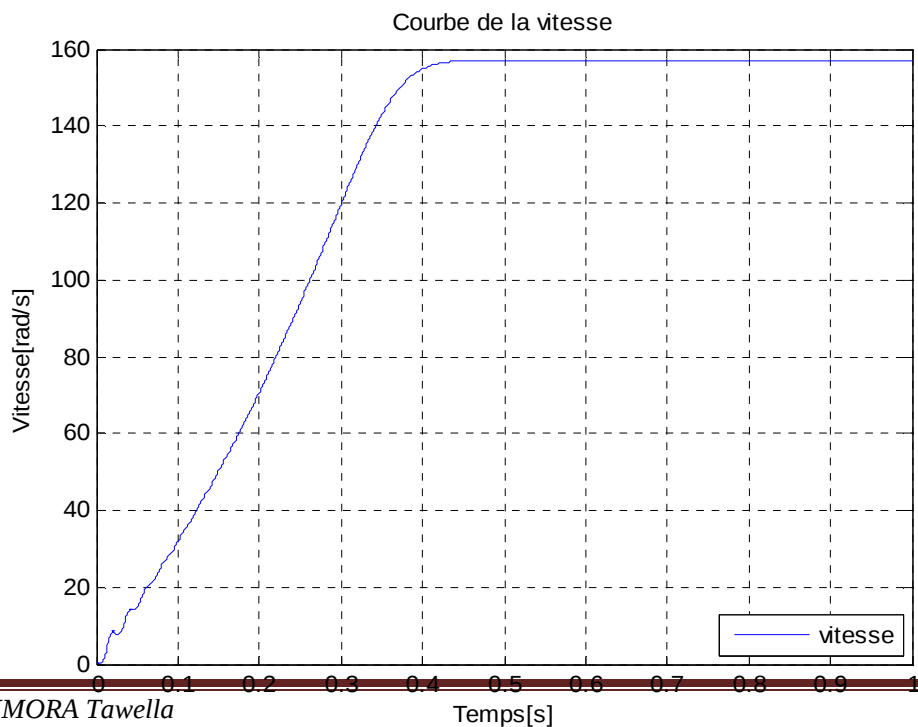
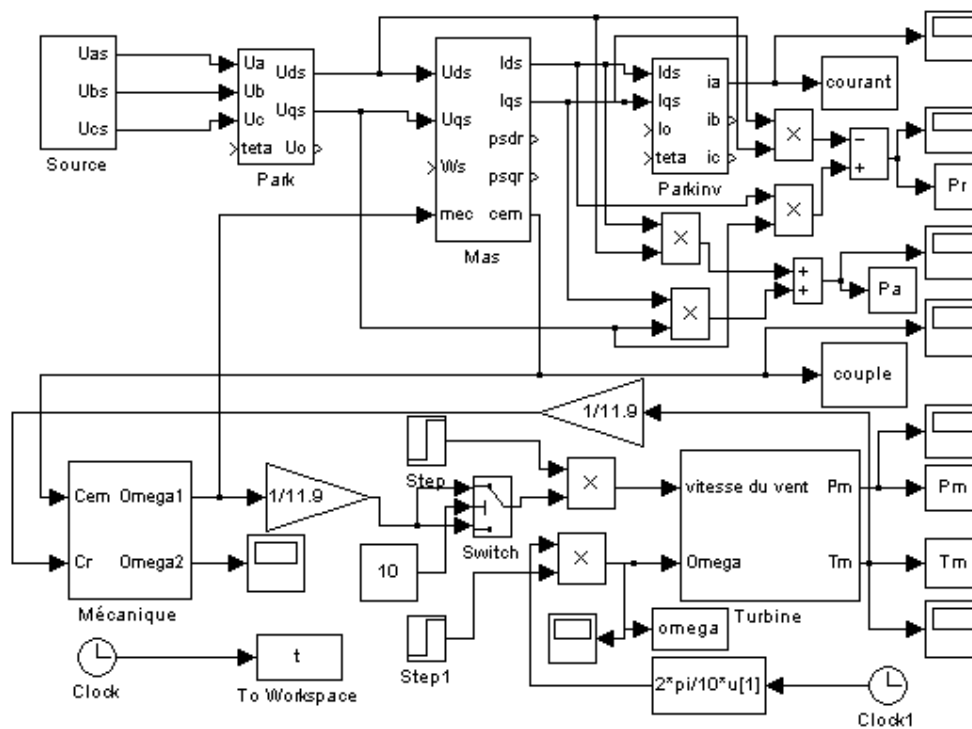


Fig.4.12 Courbe de la vitesse.

Sur cette figure, on voit que la vitesse s'accroît lentement, c'est-à-dire au démarrage le rotor de la machine tourne un peu lent avant d'atteindre sa vitesse de synchronisme. La vitesse se stabilise à 157[rad/s] car la machine possède 2 paires de pôles. Les résultats obtenus démontrent bien la justesse du modèle développé. Dans la suite, nous allons associer la machine avec la turbine et la partie mécanique.

4.4.2 Schéma bloc de l'ensemble machine, turbine et la partie mécanique

Le schéma bloc de la machine est la même que celui du précédent mais cette -fois- ci, le bloc machine est couplé avec la turbine et la partie mécanique qui a deux masses.

**Fig.4.13 Schéma bloc de l'ensemble machine turbine et mécanique.**

On peut donc visualiser les allures des courbes que précédemment moyennant encore par la simulation de l'ensemble. Les courbes ci-dessous présentent le fonctionnement en générateur de la machine asynchrone associée avec la turbine à vent.

4.4.3 Fonctionnement en générateur de la machine asynchrone associée avec la turbine et la partie mécanique de deux masses

4.4.3.1 Fonctionnement en générateur de la machine associé à la turbine

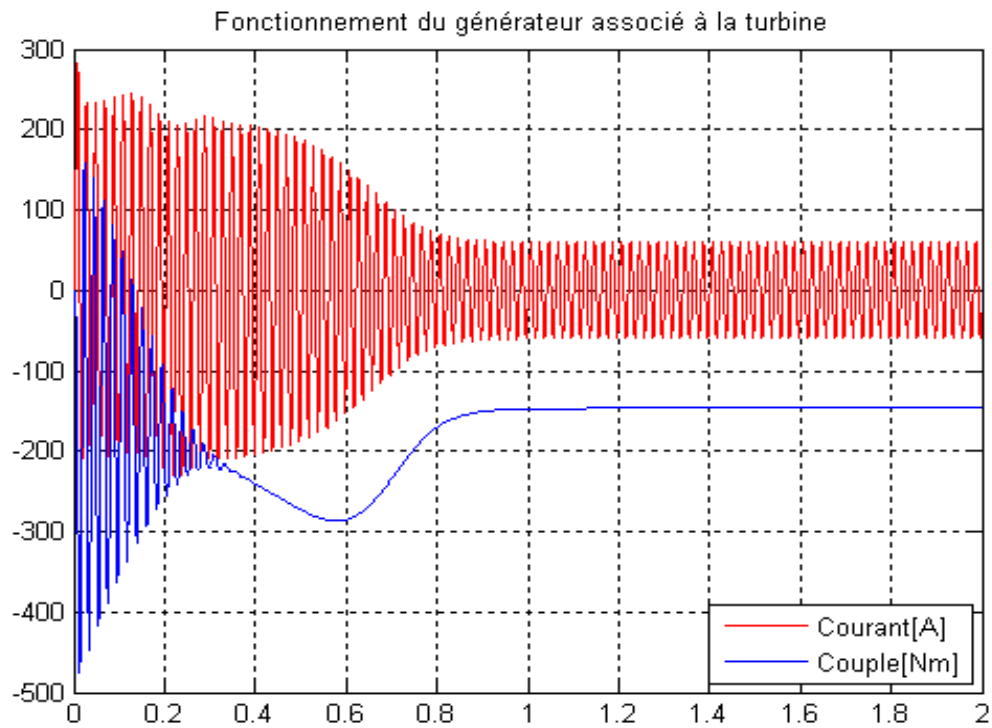
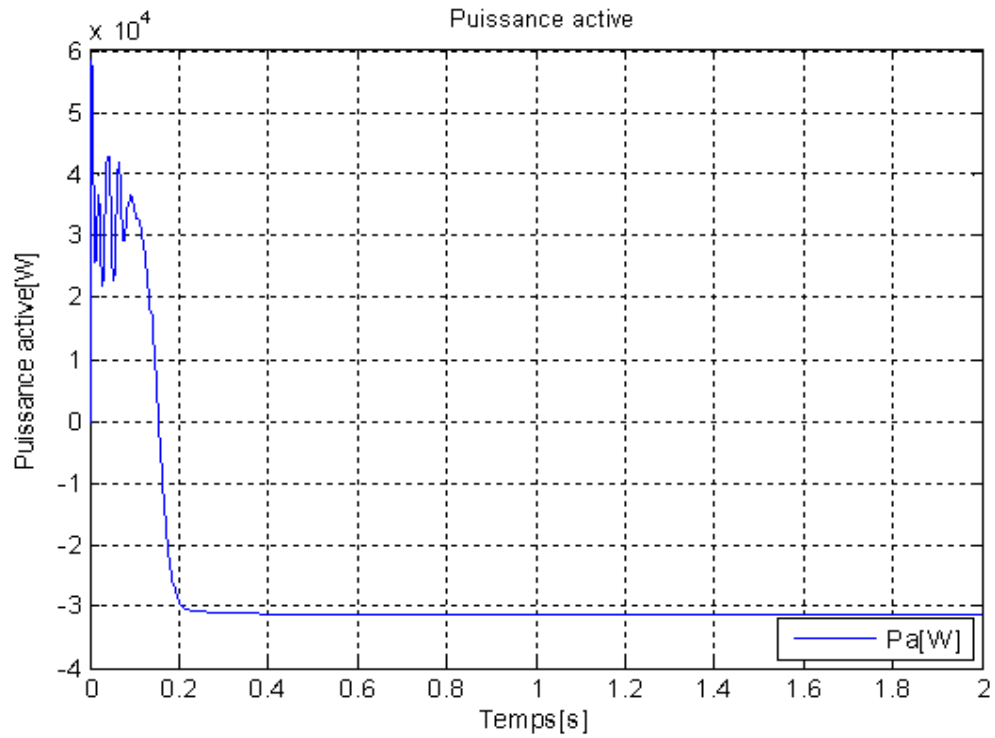
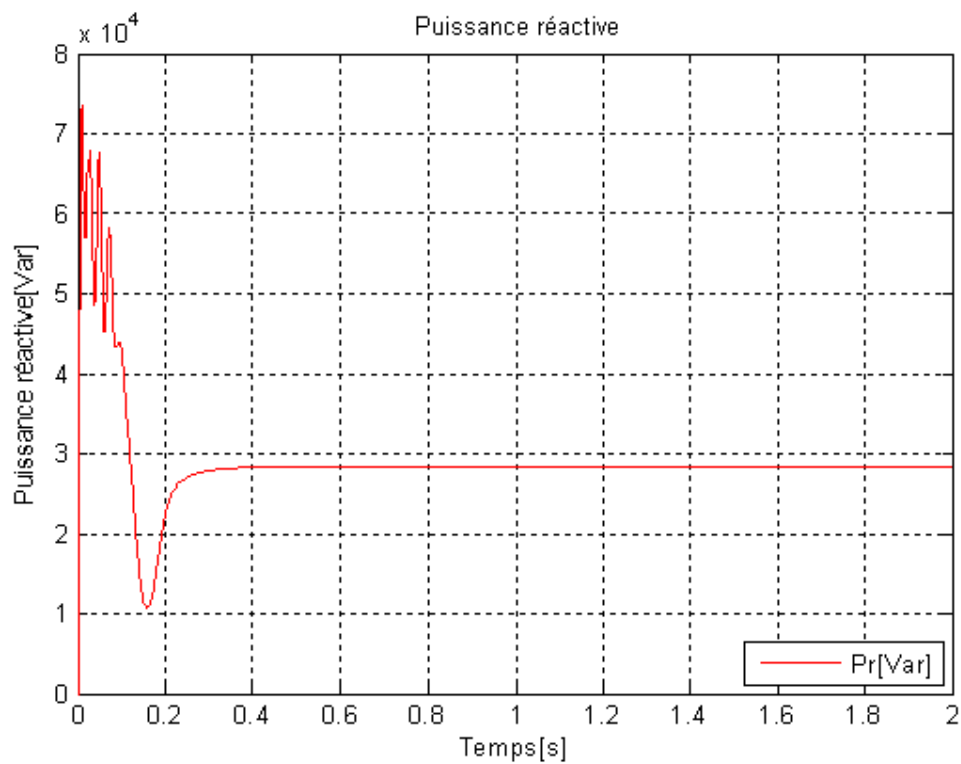


Fig.4.14 Courbe du courant et du couple électromagnétique.

4.4.3.2 Courbe de puissance active et de puissance réactive pour la vitesse du vent faible ($V=2[m/s]$)

**Fig.4.15 Courbe de puissance active.****Fig.4.16 Courbe de puissance réactive.**

4.4.3.3 Augmentation de la vitesse du vent ($V=10$ [m/s])

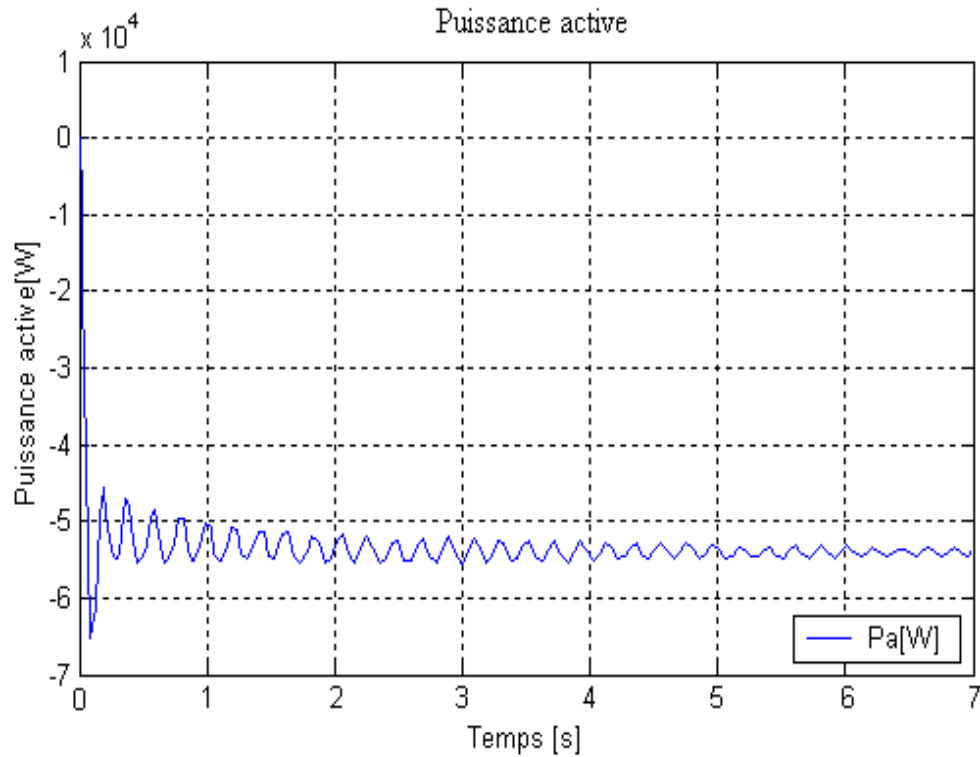


Fig.4.17 Puissance active sous l'effet de variation du vent.

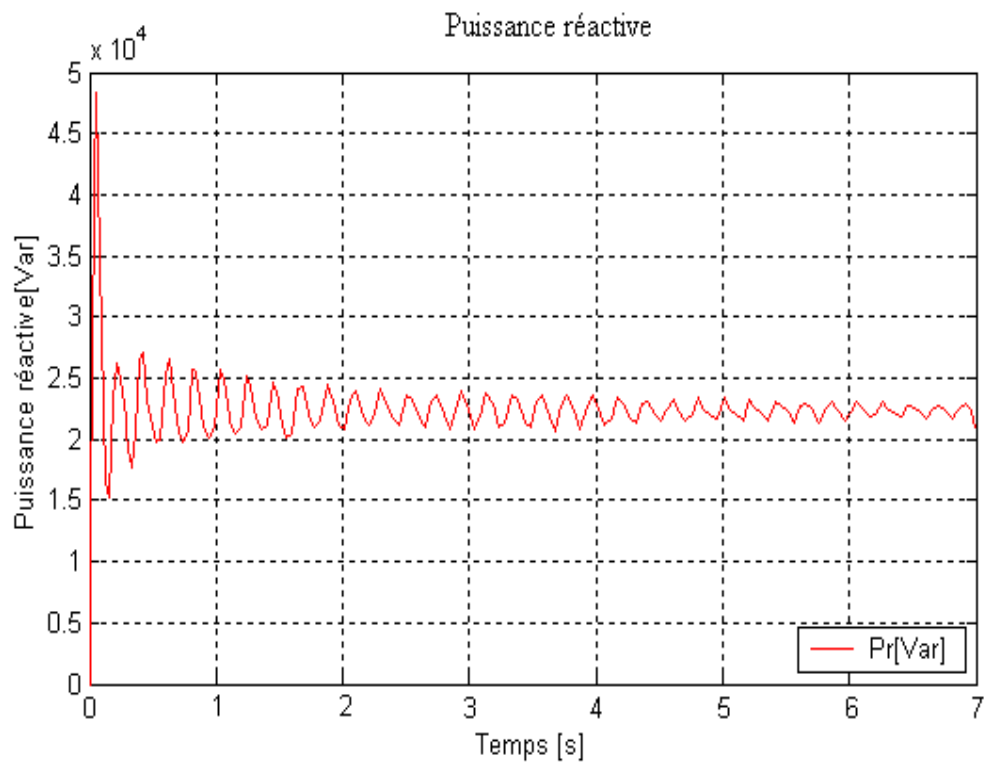


Fig.4.18 Puissance réactive sous l'effet de variation du vent.

4.4.3.4 Augmentation de la constante d'amortissement ($D_{i,j+1}=20[Nms/rad]$)

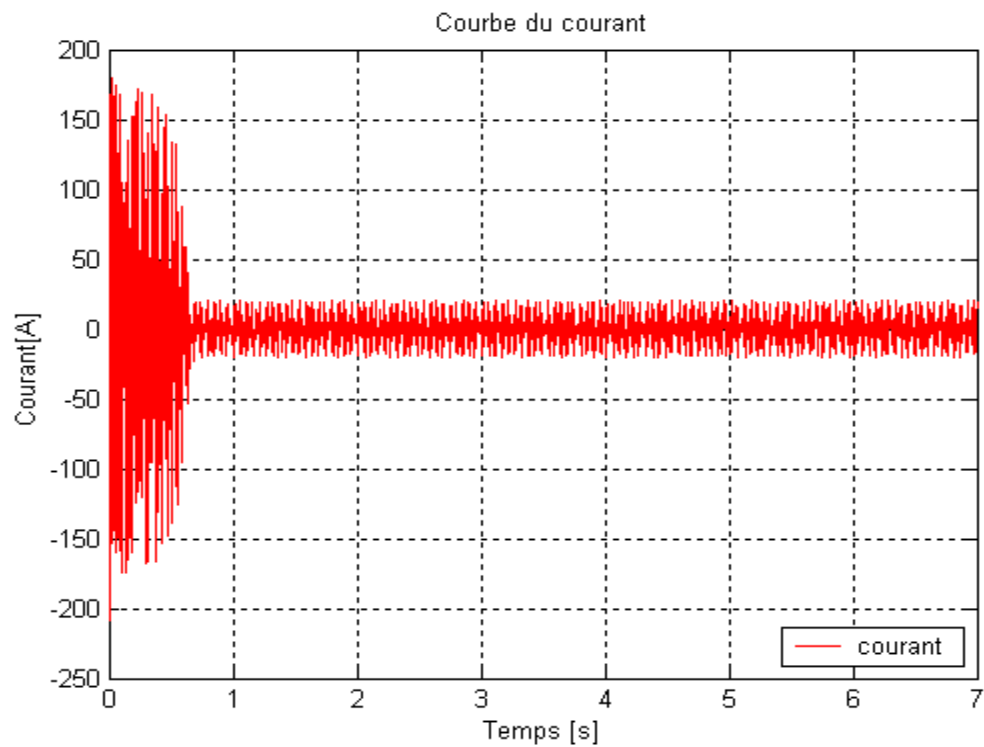


Fig.4.19 Courbe du courant statorique.

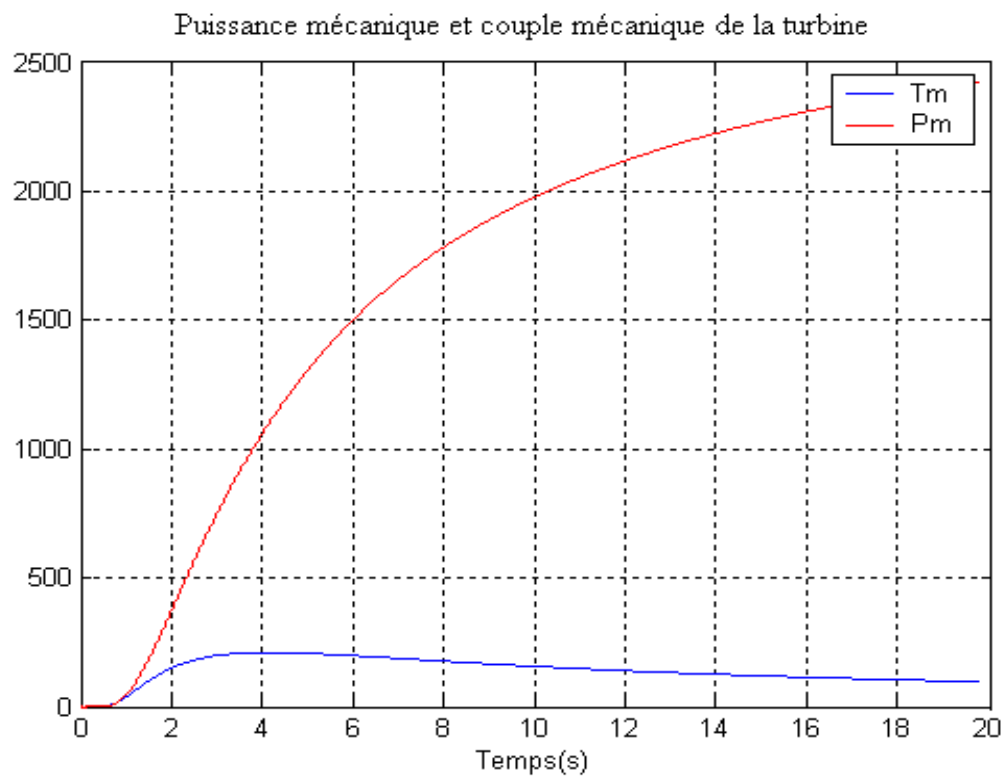


Fig.4.20 Puissance mécanique et couple mécanique de la turbine.

4.4.3.5 Augmentation de couple résistant ($C_{ri}=5[Nm/rad]$)

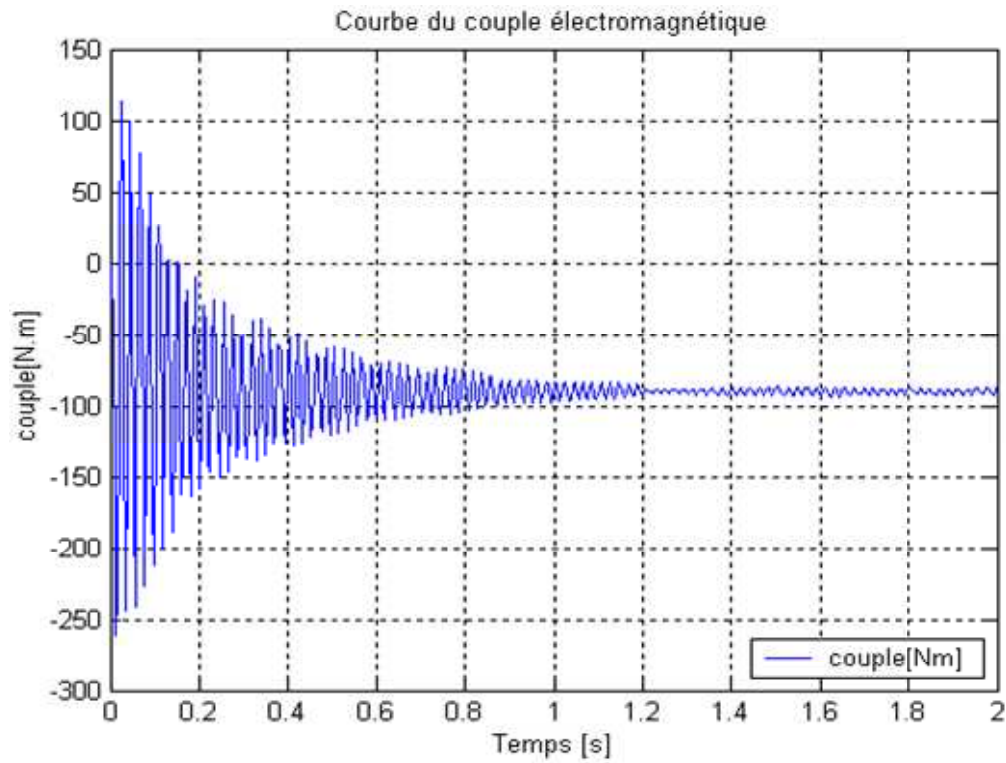


Fig.4.21 Courbe du couple électromagnétique avec l'augmentation du couple résistant.

4.4.3.6 Vitesse de rotation de la turbine

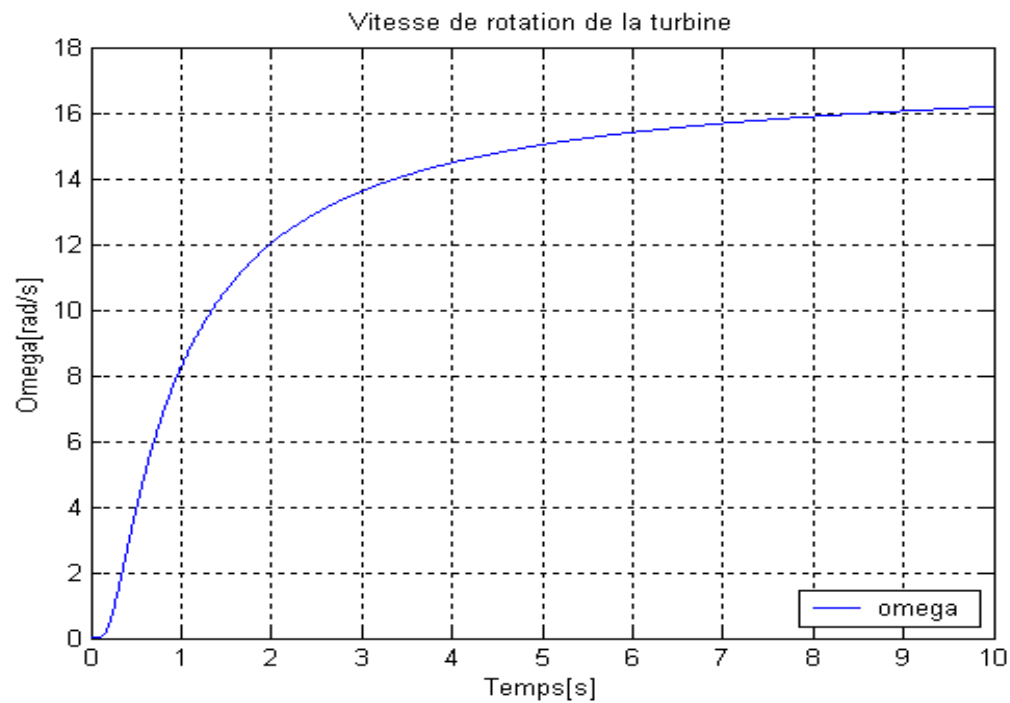


Fig.4.22 Vitesse de rotation de la turbine.

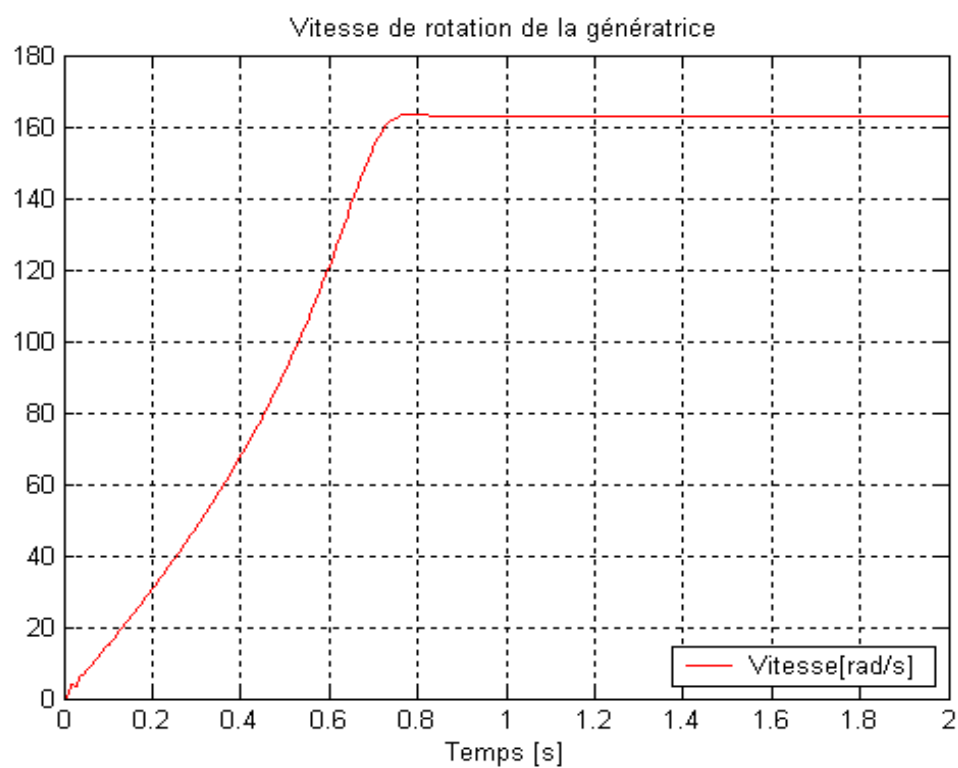


Fig.4.23 Vitesse de rotation de la génératrice.

Interprétation

Pour le fonctionnement en générateur (Fig. 4.14), le couple électromagnétique change du signe et devient négatif. Les figures 4.15, 4.16 montrent respectivement la puissance active et la puissance réactive pour la vitesse du vent faible $V=2[m/s]$. Au démarrage, les puissances ne sont pas constantes en ce moment là, la machine a de difficulté pour atteindre sa vitesse de synchronisme. A partir de $t=0.2[s]$, la machine commence à fonctionner en génératrice ; la puissance réactive est stable et positive c'est-à-dire la machine continue à absorber sa puissance réactive. La puissance active reste négative cela signifie la machine fournit de la puissance active au réseau. Et quand t-on introduit la vitesse du vent élevée $V=10[m/s]$ (Fig.4.17, 4.18) les puissances actives et réactives développent une oscillation très importante. L'augmentation de la constante d'amortissement ($D_{i,j+1}=20[Nms/rad]$) diminue l'amplitude de l'oscillation de la courbe du courant statorique (Fig.4.19). Lorsqu'on augmente le couple résistant ($C_{ri}=5[Nm/rad]$), on constate qu'il y a un retard du temps de la phase transitoire du couple électromagnétique (Fig.4.22).

Synthèse

La machine asynchrone est une machine qui peut fonctionner en moteur et en générateur. Pour que la machine fonctionne en générateur, il faut qu'elle entraîne son rotor à la vitesse hypersynchronisme pour fournir l'énergie électrique. Ce n'est pas tout à fait la même que la génératrice synchrone ; il ne possède pas des générateurs circuits d'excitation. En fonctionnement moteur le couple électromagnétique est positif par contre en générateur il change de signe et devient négatif.

Lors de l'accouplement de la génératrice asynchrone à la turbine, le problème qui se pose est la vibration de la pale. Cette vibration entraîne la fatigue de l'éolienne et elle provoque la mauvaise énergie obtenue. La faiblesse de la vitesse du vent ne conduit pas l'éolienne, du fait machine reste toujours du fonctionnement en moteur. Lorsqu'on augmente la vitesse du vent les puissances (active et réactive) ont une oscillation plus remarquable cela signifie que l'éolienne a une influence à la machine. Pour atténuer et amortir les vibrations du mécanisme, il faut employer les matériaux à fort amortissement. Il est également à suggérer de multiplier le nombre de pales et de concevoir une commande plus précise surtout pour la rotation des pales.

Chapitre 5 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE

INTRODUCTION

L'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique (E.N.S.E.T) est une école de formation des futurs enseignants des Lycées Techniques et d'Enseignement Général. Les étudiants de cette école doivent jouir non seulement des connaissances acquises à l'école, mais également ils doivent pratiquer au sein des Lycées en classe de 5^{ème} Année pour avoir une vision concrète sur l'enseignement. En tant que normaliens, les étudiants doivent savoir développer et appliquer leur travail de mémoire de fin d'études au programme scolaire des Lycées. Plus précisément, le travail de l'étudiant est indispensable à viser l'amélioration et le développement de l'enseignement en proposant des thèmes, des procédés et des techniques convenables au besoin de l'éducation.

En effet, cette introduction est très importante dans ce mémoire de fin d'études. Un étudiant normalien ne doit jamais négliger cette partie dans son travail. C'est pourquoi, dans cette dernière partie, on a introduit cette séquence pédagogique.

Dans ce chapitre, nous allons essayer de développer deux thèmes : l'un sur l'étude théorique de la machine asynchrone en proposant des exercices et l'autre sur l'étude pratique.

5.1 THEME1 : ETUDE THEORIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE

5.1.1 Fiche de préparation

Date : 02 décembre 2009

Objectif : A la fin de cette séance, les élèves devront être capables de :

- Décrire une machine asynchrone ;
- Déterminer le bilan des puissances ;
- Entraîner les élèves aux exercices.

Pré requis : Notion sur le transformateur triphasé

Aide pédagogique : tableau, règle, craie de couleur, photocopiés

Bibliographie : -Jean NIARD, Machine électrique, Nathan Technique, Terminale F3

-Henry NEY, Electrotechnique et Normalisation, 4équipements de puissance

-Cours sur les machines asynchrones, ENSET 2008

Matière : Electrotechnique

Métier : Technicien de Maintenance Electrotechnique

Classe : 3^{ème} Année

Durée : 8 heures

Plan :

- Présentation
- Glissement
- Fonctionnement
- Description du moteur
- Bilan des puissances
- Rendement
- Exercices d'application

5.1.2 Présentation

La machine asynchrone est une machine tournante, un convertisseur électromécanique. C'est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotation, pour une fréquence donnée f , dépend de la charge et dans laquelle $f \neq pn$, où p est le nombre de paires de pôles de la machine.

5.1.3 Glissement

Le glissement d'une machine asynchrone est le rapport de la fréquence synchronisme et la fréquence de rotation du rotor.

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} ; \quad (5-1)$$

où :

n_s : fréquence de synchronisme

n : fréquence de rotation du rotor

$$\text{ou encore } g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}. \quad (5-2)$$

Si $g = 0$, pour $n = n_s$, alors il n'y a pas de couple ;

Si $g < 0$, pour $n > n_s$, alors la machine fonctionne en génératrice asynchrone ;

Si $g > 0$, pour $n < n_s$, alors la machine fonctionne en moteur asynchrone ;

Si $g = 1$, pour $n = 0$, alors le moteur s'arrête.

5.1.4 Fonctionnement

Le glissement g est positif et le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant, le moteur reçoit donc du réseau de l'énergie active et réactive.

Le glissement g est négatif et le rotor tourne à une vitesse légèrement supérieure à celle de champ tournant, la génératrice fournit la puissance active mais elle continue à absorber la puissance réactive.

5.1.5 Description du moteur

Le moteur asynchrone est constitué par deux parties :

Le rotor, partie tournante qui permet de mettre en rotation la charge mécanique.

Le stator, partie fixe de la machine où est connectée l'alimentation électrique.

5.1.5.1 Types de rotor

Le moteur asynchrone est classé selon la construction de son rotor. Il en existe de deux types :

- ✓ Le rotor à cage d'écureuil est fabriqué à l'aide des barres métalliques ou en alliage aluminium parallèles et relié(e)s par deux couronnes de faible résistance.
- ✓ Le rotor bobiné : dans les encoches sont placés des conducteurs formant un bobinage triphasé de structure semblable à celle des enroulements statoriques.

Puissance absorbée

La puissance absorbée de la machine est donnée par :

$$P_a = \sqrt{3} \cdot U I \cos \varphi \text{ ou } P_a = P_1 = 3 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1. \quad (5-3)$$

Perte au stator

Les pertes dans le fer du stator sont plus particulièrement indépendantes de la charge

$$P_{fs} = P_{10} - P_m \text{ avec } P_{10} = 3 \cdot V_1 \cdot I_{10} \cdot \cos \varphi_0. \quad (5-4)$$

Perte joule au stator

Si R est la résistance de l'enroulement d'une phase :

$$\text{En étoile : } P_{js} = 3 \cdot R \cdot I_1^2. \quad (5-6)$$

$$\text{En triangle : } P_{js} = 3 R I_1^2 = 3 R \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 = R I_1^2. \quad (5-7)$$

Si R est la résistance mesurée entre deux bornes, quel que soit le couplage :

$$P_{js} = \frac{3}{2} \cdot r \cdot I_1^2. \quad (5-8)$$

D'où la perte joule totale est :

$$P_{tjs} = P_{js} + P_{fs}. \quad (5-9)$$

Puissance transmise au rotor ou puissance électromagnétique

$$P_{em} = P_{Tr} = T_e \Omega_s ; \quad (5-10)$$

$$P_{em} = P_1 - P_{tjs} ; \quad (5-11)$$

$$P_{em} = 3 \frac{R_{\acute{e}q}}{g} I_2^2. \quad (5-12)$$

Au niveau rotor, on a deux pertes : P_{fr} et P_{jR}

Si on donne la résistance R ; la perte joule rotoriques est :

$$P_{jR} = 3 \cdot R \cdot I_2^2. \quad (5-13)$$

Puissance mécanique

$$P_{méc} = T_{em} \cdot \Omega ; \quad (5-14)$$

$$P_{méc} = P_{tr} - P_{jR}. \quad (5-15)$$

Perte totale au rotor

$$P_{tR} = g \cdot P_{em}. \quad (5-16)$$

La perte fer rotorique est négligeable devant la perte joule rotorique

Puissance utile

$$P_u = P_{em} - P_{tr} ; \quad (5-17)$$

$$P_u = T_u \cdot \Omega. \quad (5-18)$$

5.1.5.2 Bilan des puissances

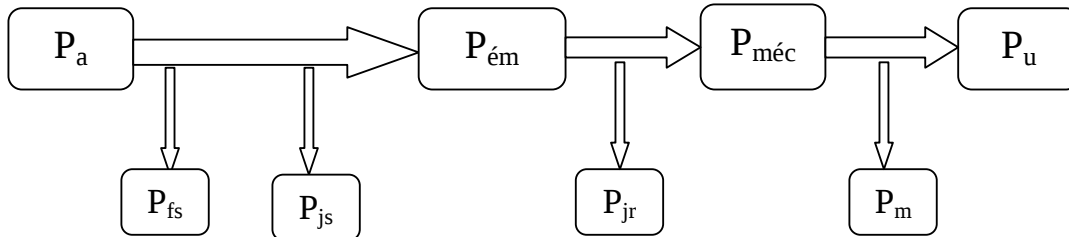


Fig.5.1 Bilan des puissances d'une machine asynchrone.

5.1.5.3 Rendement

Il est défini par :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} ; \quad (5-19)$$

$$\text{avec : } P_a = P_u - \sum \text{pertes}. \quad (5-20)$$

5.1.5.4 Exercices d'application

Soit un moteur asynchrone triphasé dont $p = 3$, on a ramené $R_{\text{éq}} = R_2 = 0.18 \Omega$ et $X_2 = 1.2 \Omega$, $V_1 = 220V$ (stator monté en étoile) le rapport de la transformation $m = 0.4$.

Pour $g = 0,05$:

- 1) Déterminer les valeurs des courants I'_1 et I_2
- 2) Déterminer la puissance électromagnétique, la perte joule au rotor et la puissance mécanique.
- 3) On a mesuré $I'_{10a} = 0.6A$ et $I'_{10r} = 2.73A$;
 - a) Calculer R_0 et X_0
 - b) En déduire P'_{10}

Solution :

- 1) Détermination des courants I'_1 et I_2 :

$$\text{Par définition } I'_1 = m \cdot I_2, \text{ or } I_2 = \frac{g \cdot m \cdot V_1}{\sqrt{R_{\text{éq}}^2 + (g \cdot X_2)^2}} ; \quad (5-21)$$

$$\text{d'où : } I'_1 = \frac{g \cdot m^2 \cdot V_1}{\sqrt{R_{\text{éq}}^2 + (g \cdot X_2)^2}} ; \quad (5-22)$$

$$I'_1 = \frac{V_1}{Z} ; \quad (5-23)$$

$$\text{Avec } Z = \sqrt{\left(\frac{R_{\text{éq}}}{g \cdot m^2}\right)^2 + \left(\frac{X_2}{m^2}\right)^2}$$

AN:

$$R_{\text{éq}} = 0.18 \, \Omega$$

$$X_2 = 1.2 \, \Omega$$

$$g = 0.05$$

$$m = 0.4$$

$$V_1 = 220 \, \text{V}$$

$$\frac{R_{\text{éq}}}{g \cdot m^2} = \frac{0.18}{0.05 * (0.4)^2} = 22.5 \, \Omega$$

$$\frac{X_2}{m^2} = \frac{1.2}{(0.4)^2} = 7.5 \, \Omega$$

$$Z = \sqrt{(22.5)^2 + (7.5)^2} = 23.72 \, \Omega$$

$$I'_1 = \frac{220}{23.72} = 9.28 \, \text{A}$$

$$I'_1 = 9.28 \, [\text{A}]$$

On sait que $I'_1 = m \cdot I_2 \Rightarrow I_2 = \frac{I'_1}{m}$; (5-24)

AN :

$$I_2 = \frac{9.28}{0.4}$$

$$I_2 = 23.2 \, [\text{A}]$$

2) Calcul des puissances P_{em} , P_{jR} , $P_{\text{méc}}$

La puissance électromagnétique est donnée par la formule (5-12) :

$$P_{\text{em}} = \frac{3R_{\text{éq}}}{g} \cdot I_2^2 = \frac{3R_{\text{éq}}}{g \cdot m^2} \cdot I_1'^2$$

AN :

$$P_{\text{em}} = \frac{3 * 0.18}{0.05} * (23.2)^2$$

$$P_{\text{em}} = 5792.96 \, [\text{W}]$$

D'après la relation (5-16)

AN :

$$P_{jR} = 0.05 * 5792.96$$

$$P_{jR} = 289.64 \, [\text{W}]$$

En utilisant la relation (5-15)

AN :

$$P_{méc} = 5792.92 - 289.64$$

$$P_{méc} = 5503.31[W]$$

3-a) Calcul de X_0 et R_0

$$V_1 = X_0 * I'_{10r} \Rightarrow X_0 = \frac{V_1}{I'_{10r}}$$

AN:

$$X_0 = \frac{220}{2.73}$$

$$X_0 = 80.58[\Omega]$$

$$V_1 = R_0 * I'_{10a} \Rightarrow R_0 = \frac{V_1}{I'_{10a}}$$

AN:

$$R_0 = \frac{220}{0.6}$$

$$R_0 = 366.66 [\Omega]$$

b) Dédution de P'_{10}

$$P'_{10} = 3 \cdot V_1 \cdot I'_{10a}$$

$$P'_{10} = 3 * 220 * 0.6$$

$$P'_{10} = 396[W]$$

Exercice**Moteur asynchrone triphasé**

Un moteur asynchrone triphasé a donné aux essais (tensions entre phases) à la fréquence $f=50\text{Hz}$.

A vide : $U_0 = 220 \text{ V}$; $P_0 = 445\text{W}$; $I_0 = 5\text{A}$; $n_0 = 1500\text{tr/mn}$

En charge : $U=220 \text{ V}$; $P_a = 3750 \text{ W}$; $I=12 \text{ A}$; $n=1440 \text{ tr/mn}$

En continu : résistance mesurée, à chaud, entre deux bornes du stator $R_m = 1.2\Omega$

Calculer :

- 1-Le nombre de pôles du moteur.
- 2-Le glissement g et le facteur de puissance en charge.
- 3-Les pertes fer du stator et les pertes mécaniques en les supposant égales.
- 4-Les pertes joules statoriques et rotoriques.
- 5-La puissance utile et le rendement.
- 6-Le couple électromagnétique et le couple utile.

5.2 REFLEXION SUR L'ENSEIGNEMENT DES MACHINES ASYNCHRONES AUX LYCEES TECHNIQUES

Aujourd'hui, les machines asynchrones jouent un rôle très important dans l'industrie et même dans la vie courante. Leurs utilisations favorisent et garantissent le développement de plusieurs secteurs d'un pays. C'est pourquoi on doit lancer l'apprentissage sur l'étude d'une machine asynchrone, dès le plus bas niveau possible. Le but est qu'à la sortie du Lycée Technique ou de l'Université les élèves devront être capables de poursuivre leurs études et/ou de s'intégrer dans la vie active et professionnelle. Pour arriver à cela, les enseignants sont obligés d'appliquer les méthodes, les techniques et les procédés d'enseignement.

5.3 THEME 2 : ETUDE PRATIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE

Comme nous le savons, les élèves du Lycée Technique et les étudiants de l'Université de l'ENSET ont l'avantage du cours de machines asynchrones du fait qu'à partir de 3^{ème} Année on le commence. A part de l'étude théorique et des exercices, les enseignants doivent consacrer un peu plus de temps sur les pratiques. Etant donné que la maîtrise de la théorie sans connaissance de pratique nous semble insuffisante. Vu la lacune susmentionnée, proposons des séries des travaux pratiques.

5.3.1 Fiche de préparation

Date : 02 décembre 2009

Objectif : A la fin de cette séance, les élèves devront être capables de :

- Faire les différents types d'essais ;

Pré requis : Manipulation des appareils de mesure

Aide pédagogique : schéma du montage, craie de couleur, Ampèremètre, voltmètre

Bibliographie : -Baccalauréat Professionnel et Technique 2008

Matière : Electrotechnique

Métier : Technicien de Maintenance Electrotechnique

Classe : 3^{ème} Année

Durée : 8 heures

Plan :

- Essai à vide ;
- Essai à rotor bloqué ;
- Essai en continu.

5.3.2 Essais de détermination des paramètres de la machine asynchrone

Les essais ou les pratiques consistent à approfondir la connaissance des élèves acquise pour la théorie. C'est la raison pour laquelle, j'ai proposé cette pratique. La modélisation d'une machine asynchrone n'est pas dans le programme de terminale ou 3^{ème} du Lycée Technique. Mais pour trouver les valeurs des éléments de la machine asynchrone, on effectue 3 essais :

- Essai à vide ;
- Essai en continu ;
- Essai à rotor bloqué.

a) Essai à vide

L'essai à vide consiste à trouver les pertes dans le fer R_{fer} et l'inductance magnétique X_m . Dans cet essai, on considère que le glissement $g_{\text{vide}}=0$, mais la vitesse à vide est plus proche de la vitesse nominale. La résistance r est infinie et le schéma équivalent à la phase du moteur devient proche de :

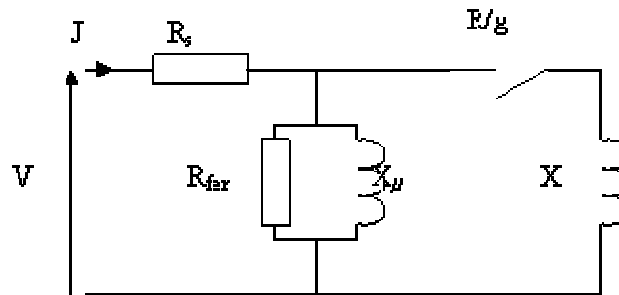


Fig.5.2 Modèle par phase lors de l'essai à vide.

Après les mesures, on obtient les résultats ci-dessous. La mesure de la puissance active et réactive permet donc de calculer la résistance dans le fer R_{fer} et l'inductance magnétisante X_m .

$$P_v = 186 \text{ W}$$

$$U = 400 \text{ V (tension sur 1 enroulement : } V = 230 \text{ V)}$$

$$I_v = 1.66 \text{ A (= montage étoile)}$$

$$Q = 1.14 \text{ KAR}$$

On peut représenter les valeurs sous forme tableau ci-dessous :

U[V]	V[V]	I[A]	Q[KVAR]
400	230	1	1.14

Tab.1 Valeurs de l'essai à vide.

• Calculs préliminaires

Les pertes joules statoriques sont :

$$P_{\text{fer}} = 3R_s I_v^2 = 45.3 \text{ [W]}.$$

Si on considère que le glissement est nul, les pertes dans le fer sont donc telles que :

$$P_{fer} = P_v - P_{js} = 142 \text{ [W]}$$

On peut en déduire R_{fer} :

$$R_{fer} = \frac{3V^2}{P_{fer}} = 1.12 \text{ [K}\Omega\text{]} .$$

De même, pour la réactance magnétisante, on obtient :

$$X_{\mu} = \frac{3V^2}{Q_v} = 139 \text{ [\Omega]} .$$

Remarque :

En réalité, on devrait recalculer la tension V' aux bornes de R_{fer} et X_{μ} .

$$R_{fer} = 142 \text{ [W]}$$

$$Q_v = 1.14 \text{ [KVAR]} .$$

b) Essai à rotor bloqué

Il consiste à effectuer des mesures à rotor bloqué (sous tension réduite et courant nominal). Dans ce cas, le glissement est égal à un. Les puissances dans R_{fer} et dans X_m deviennent négligeables devant les autres (elles sont proportionnelles au carré de la tension d'alimentation). Cet essai nous permet de calculer la résistance R et l'inductance magnétique X . La manipulation se réalise de la façon suivante : on met la commande du frein à 100% (ne pas oublier de mettre en route la ventilation du frein, et effectuer la mesure assez rapidement), puis on augmente très progressivement la tension jusqu'à avoir le courant nominal ($I_n = 3.2 \text{ A}$), enfin, on mesure les puissances actives et réactives.

Après avoir effectué les essais, voici les résultats obtenus :

Pour 1 phase : $P_{RB} = 87 \text{ W}$

$$Q_{RB} = 123 \text{ var}$$

$$U_{RB} = 82 \text{ V (tension aux bornes d'un enroulement : 47.3 V)}$$

$$I_{RB} = 3.18 \text{ A (=} I_{RB} \text{ montage étoile)} .$$

Sous forme tableau :

$P_{RB} \text{ [W]}$	$Q_{RB} \text{ [VAR]}$	$U \text{ [V]}$	$I \text{ [A]}$
87	123	82	3.18

Tab.2 Valeurs de l'essai à rotor bloqué.

Calculs préliminaires :

On calcule, par phase, la puissance dissipée dans R , lors de l'essai à rotor bloqué, obtient :

$$P = P_{RB} - R_s I_{RB}^2 = 69.5 \text{ [W]} . \quad (5-27)$$

Alors, on en déduit les valeurs de R et X (toujours en négligeant les puissances dans R_{fer} :

$$R = \frac{P}{I_{RB}^2} = 6.8 \text{ [\Omega]} ; \quad (5-28)$$

$$X = \frac{Q_{RB}}{I_{RB}^2} = 12.2 [\Omega]. \quad (5-29)$$

c) Essai en continu

Il a pour but de mesurer la résistance statorique par phase. On utilise un montage voltampère métrique, en continu, et on mesure la tension et le courant (sans dépasser I_n). On obtient la valeur de la résistance en appliquant la loi d'ohm :

$$R_s = \frac{DU}{2DI}. \quad (5-30)$$

Les valeurs mesurées sont présentées par le tableau ci-dessous :

U[V]	4	7	10	15.3	20.2	25.2	30.5
I[A]	0.36	0.63	0.91	1.38	1.82	2.27	2.75

Tab.3 Valeurs de l'essai en continu.

On en déduit la valeur de la résistance statorique :

$$R_s = 5.55 [\Omega].$$

5.3.3 Evaluation de l'enseignement

Quand on enseigne, il est nécessaire d'évaluer ce qu'on a fait. Au début du cours, il faut faire une évaluation diagnostique, c'est-à-dire réviser ou rappeler ce qu'on a vu dans les classes antérieures. Une fois un chapitre est terminé, il faut faire une évaluation formative pour tester est ce que les élèves ont appris ?

Enfin, il est obligatoire d'évaluer tout ce qu'on a fait pendant l'année scolaire c'est-à-dire de faire une révision générale pour enrichir ou améliorer les connaissances des élèves. C'est une évaluation sommative. Voilà la raison pour laquelle j'entame à l'entraînement suivant au baccalauréat.

5.3.4 Entraînement au Baccalauréat Professionnel et Technique

Filière : Electrotechnique

Métier : Technicien de Maintenance Electrotechnique

Durée : 4 heures

Coefficient : 4

I-Electronique de puissance : (4points)

Une résistance $R=20\Omega$ est alimentée par une tension alternative sinusoïdale de valeur efficace 220V ; 50Hz à travers un thyristor.

Le temps d'amorçage de commande du thyristor est de $t_0 = \frac{T}{8}$ au début de l'alternateur ou T désigne la période.

1-Donner le schéma du montage.

- 2-Calculer en ms (milliseconde) la période T et en déduire la valeur de t_0 .
- 3-Déterminer l'angle de retard d'allumage du thyristor θ_0 .
- 4-Tracer l'allure de la tension $V_R(t)$ aux bornes de la résistance.
- 5-En déduire V_R moyenne et V_R efficace.

II-Moteur Asynchrone triphasé : (6points)

Un moteur asynchrone triphasé dont le stator est couplé en étoile est alimenté par un réseau 380V entre phase ; $f = 50\text{Hz}$. Chaque enroulement du stator a une résistance $R = 0.70\Omega$.

On réalise un essai à vide : le moteur tourne pratiquement à la vitesse $n_s = 1500\text{tr/mn}$. La puissance absorbée est de $P_0 = 844\text{ W}$ et que le courant en ligne est de $I_0 = 5.35\text{A}$.

Un essai à charge nominale sous la même tension et la même fréquence a donné les résultats suivants :

$g = 6\%$; le courant en ligne $I = 16.5\text{A}$; la puissance absorbée est de $P_a = 9.015\text{Kw}$.

- 1-Déterminer les tensions par phase et entre phase du moteur.
- 2-Calculer :
 - a) Le nombre de pôles de ce moteur.
 - b) Les pertes joules statoriques à vide.
 - c) Les pertes fer statoriques sachant que les pertes mécaniques valent 501W (pertes joules rotoriques à vide négligeables).
 - d) La vitesse de rotation nominale.
 - e) Le facteur de puissance nominale.
 - f) Les pertes joules statoriques en charge
 - g) La puissance transmise au rotor.
 - h) Les pertes joules rotoriques en charge.
 - i) Le rendement du moteur et en déduire le couple utile.

III-Transformateur triphasé : (6points)

Les essais d'un transformateur d'isolement triphasé, couplage YY ont donné les résultats suivant :

-Essai à vide : $U_{10} = 380\text{V}$; $U_{20} = 440\text{V}$

-Essais en court circuit : $U_{1cc} = 19\text{V}$; $I_{2cc} = 4.5\text{A}$; $P_{1cc} = 81\text{W}$.

- 1-Déterminer le rapport de transformateur à vide.
- 2-Calculer la résistance et la résistance vue du secondaire par phase.
- 3-Le transformateur est alimenté sous 380V, débite sur un récepteur triphasé symétrique inductif de $\cos \varphi_2 = 0.8$ un courant $I_2 = 4.5\text{A}$.
Quelle sera la tension entre phase au secondaire ?
- 4-Le secondaire est maintenant chargé par trois résistances identiques $R = 60\Omega$ montées en étoile.
Quelle sont les valeurs de courant de ligne et de la tension entre phase au secondaire ?

IV-Alternateur triphasé : (4points)

Un alternateur triphasé est constitué par trois enroulements montés en triangle. Il a donné aux essais à vide :

$I_{ex}[A]$	0	4	7	10	15	17	20
$E[V](\text{entre phase})$	0	1240	2000	2480	2800	2900	3000

En court circuit : $I_{cc} = 130A$ pour $I_{ex} = 5A$.

- 1) Tracer les courbes à vide $E=f(I_{ex})$ et $I_{cc} = f(I_{ex})$

(sur le papier millimètre à rendre avec la feuille de copie)

Echelle : pour $I_{cc} = \frac{50A}{cm}$.

pour $i_{ex} = 2A/cm$

pour $E[V] = 200V/cm$

- 2) A partir de la courbe, déterminer la f.é.m $E[V]$ par phase pour $i_{ex} = 5A$.
 3) Déterminer l'impédance par phase de l'alternateur.
 4) Quelle doit être la valeur du courant d'excitation lorsque l'alternateur débite un courant de $I=100A$ pour avoir $U=2000V$ et $\cos \varphi = 0.8$? (on néglige la résistance interne).

NB : on utilise la méthode de Behn-Enschenburg.

5.3.5 Conseils sur l'enseignement

Voici quelques conseils à suivre pour que l'enseignement soit efficace :

- Contrôler la présence physique des élèves et les appeler par leurs noms avant de commencer le cours.
- Faire un bref rappel au début du cours.
- Pour attirer leur attention, il faut se placer devant les élèves ; pour vérifier la prise des notes, il faut circuler entre eux ; pour assurer ce qui est écrit au tableau, il faut se mettre au fond.
- Si un élève n'arrive pas à résoudre un exercice, il faut lui rappeler les formules, ou les théories ou les définitions.
- Pour la correction : lire à haute voix l'énoncé, désigné le volontaire ou l'indécis ou le paresseux pour aller au tableau. Celui qui est au tableau doit parler avant d'écrire et l'enseignant doit demander l'avis du reste sur la solution à présenter.

NB : Les exercices ou les tests doivent être traités par l'enseignant (au préalable).

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail présente la conversion d'énergie éolienne à l'aide d'une machine asynchrone. Ce type de machine s'est imposé dans les industries grâce à sa robustesse, sa simplicité de construction et sa facilité de connexion à la turbine. Par contre la modélisation de cette machine est complexe à cause de son modèle qui est fortement non linéaire.

On a pu surmonter cette difficulté grâce à la disponibilité des puissants outils informatiques Matlab/Simulink. Les résultats obtenus par la simulation de la machine démontrent bien la justesse du modèle développé. Pour la vitesse de la machine, elle augmente petit à petit au démarrage pour atteindre à sa valeur nominale en un minimum de temps. Le couple est aussi assez élevé lors de démarrage direct de la machine qui résulte de l'appel du courant très important. Le couple oscille au démarrage ; cette oscillation diminue en fonction de l'accroissement de la vitesse de la machine.

L'étude de l'accouplement de la machine avec la turbine qui est la base de notre étude, c'est une tâche très difficile pour une seule spécialité, elle demande de connaissance de plusieurs disciplines comme la mécanique, la résistance des matériaux, l'électronique, l'électricité....

Dans ce travail, on a présenté les résultats du comportement de la génératrice à la turbine. Le but de ce travail est d'avoir seulement une énergie électrique provenant de l'énergie cinétique du vent. D'après les courbes de puissances obtenues, on remarque que la machine fournit de l'énergie active au réseau et absorbe de l'énergie réactive nécessaire à son alimentation. La variation brusque du vent provoque une oscillation de couple électromagnétique et des puissances actives et réactives. L'augmentation de la constante d'amortissement diminue l'amplitude de l'oscillation de la courbe du courant statorique. L'augmentation du couple résistant provoque un retard du temps de la phase transitoire du couple électromagnétique.

Pour obtenir un bon rendement d'énergie, il est à suggérer de multiplier le nombre des pales, de concevoir une commande précise de la rotation du rotor de la turbine et de régler le multiplicateur de vitesse.

Enfin, une séquence pédagogique finalise le travail. Pour justifier son titre de l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Analyse de Projets d'énergies propres

Manuel d'Ingénierie et d'Etudes de cas RetScreen 2002

<http://www.retscreen.net/>.

[2] Adam MERICKI

Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance (Thèse de doctorat). Polytechnique de Toulouse, 5 Avril 2005

[3] Comblong HARITZA

Minimisation de l'impact de perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables (Thèse de doctorat). ENSAM, Bordeaux, 2003.

[4]Frédéric POITIERS

Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne (Thèse doctorat). Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, 19 décembre 2003.

[5] Jean CHATELIN

Machine électrique, traité d'électricité volume X. Presse Polytechnique romande 1987.

[6] Lionel PREVOST

Initiation à Matlab. UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

[7] Patrick Brunet LTEG Henri BRISSON

Introduction à la commande vectorielle des machines asynchrones

25 Avenue Henri BRISSON 18108 VIERZON.

Tél : 02 48 52 7400 mél : **parbrune @ wanadoo.fr**

[8]Tsimi Aristol

Influence dynamique du vent sur une génératrice éolienne

Mémoire pour l'obtention du diplôme DEA, 2007.

ANNEXE

A.1 Paramètres utilisés

Turbine

Puissance de la turbine	$P=55$ [KW]
Diamètre de pale	$D=10$ [m]
Nombre de pales	3
Vitesse de la turbine	$\Omega =142$ [tr/mn]
Rapport de boîte de vitesse	10.2

Machine asynchrone

Puissance	$P=3$ [KW]
Résistance statorique par phase	$R_s=0.29$ [Ω]
Résistance rotorique par phase	$R_r=0.38$ [Ω]
Inductance cyclique du stator	$L_s=50$ [mH]
Inductance cyclique du rotor	$L_r=50$ [mH]
Inductance mutuelle	$M=47.3$ [mH]
Nombre de paires de pôles	$2p=4$
Tension nominale	$U_n=220$ [V]
Courant nominal	$I_n=25$ [A]

Système de deux masses

Moment d'inertie de la masse 1	6 [kg.m^2]
Moment d'inertie de la masse 2	4.5 [kg.m^2]
Coefficient de rigidité	$K_{i,j+1}=2700$ [Nms/rad]
Coefficient d'amortissement	$D_{i,j+1}=0.001$ [Nms/rad]
Couple résistant	$C_r=0.001$ [Nms/rad]

A.2 Schéma bloc de la source

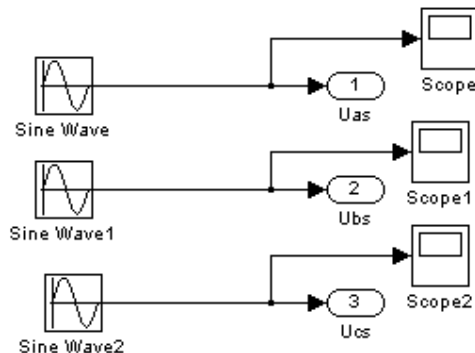


Fig. A.1 Schéma bloc de la source.

A.3 Schéma fonctionnel du vent

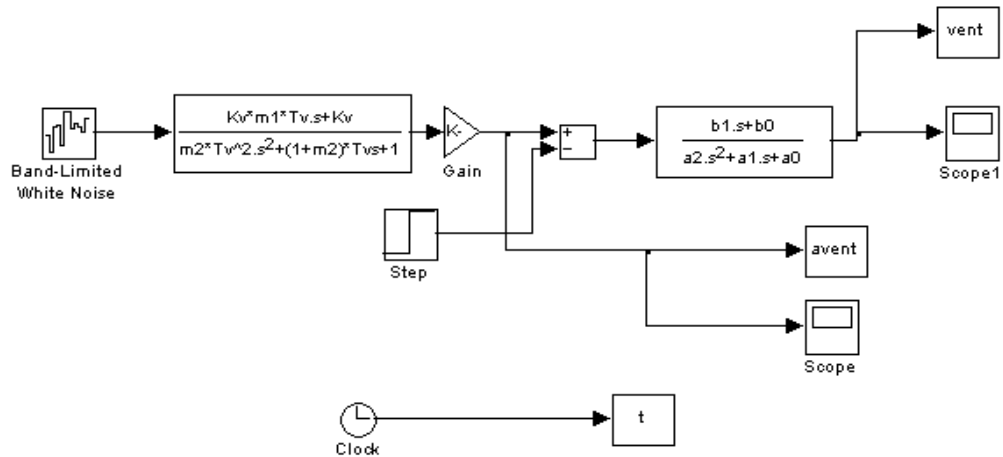


Fig. A.2 Schéma fonctionnel du vent.

A.4 Schéma bloc de la partie mécanique

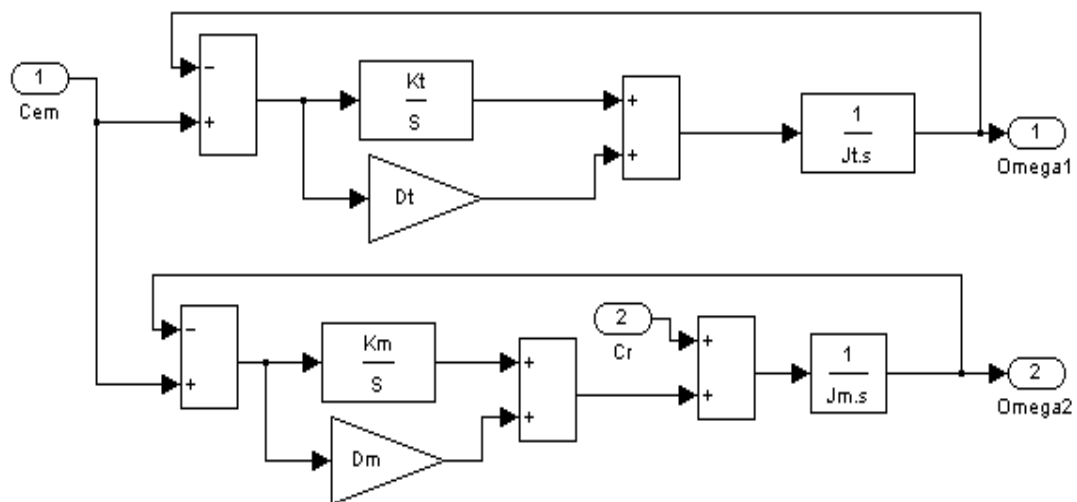


Fig. A.3 Schéma bloc de la partie mécanique à deux masses.

A.5 Schéma bloc de la machine asynchrone avant de coupler à la partie mécanique

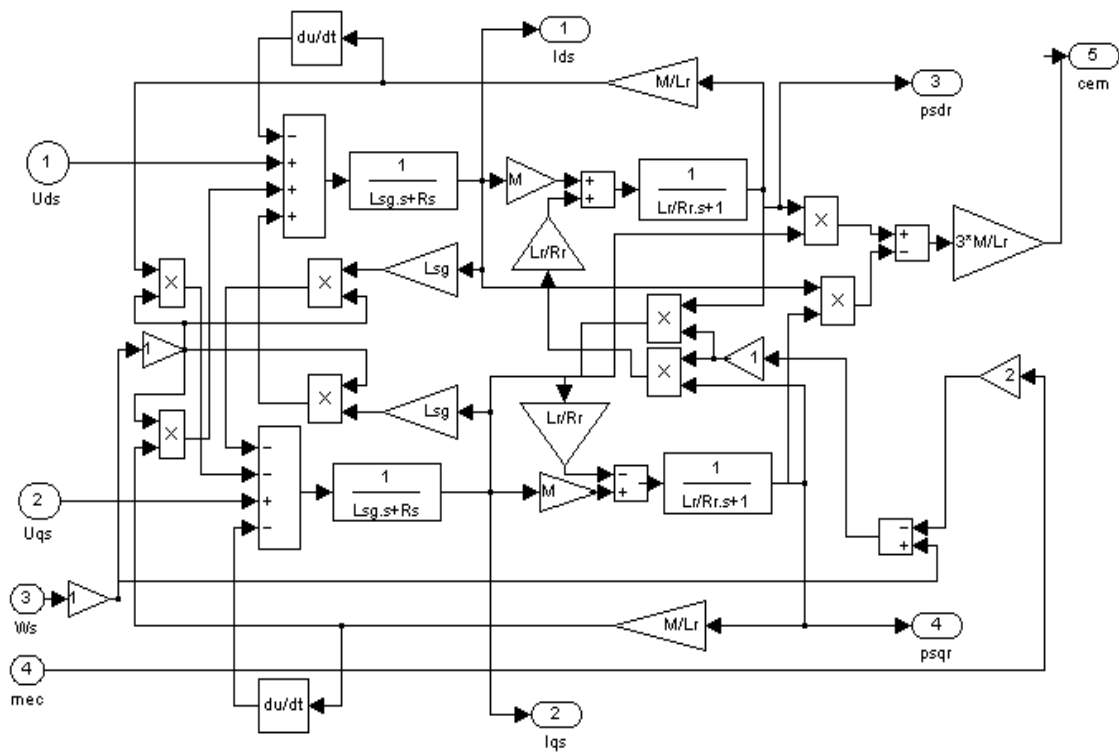


Fig. A.4 Schéma bloc de la machine asynchrone avant de coupler à la partie mécanique.

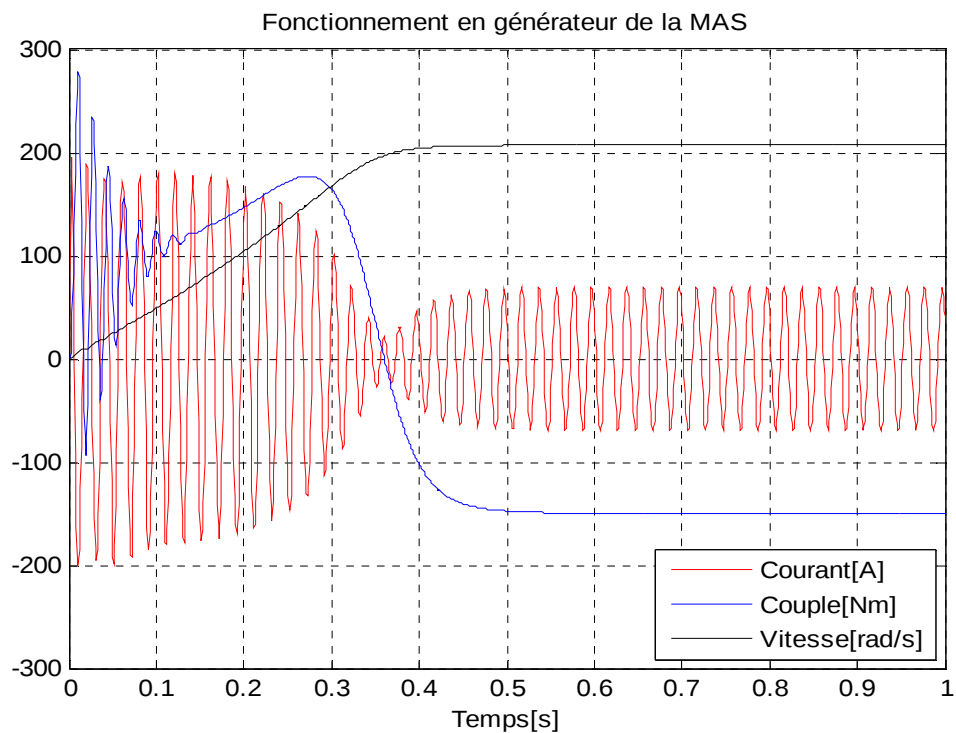


Fig. A.5 Augmentation de la vitesse au-delà de synchronisme.

A.6 Programme de simulation

% Programme de simulation de la machine et la Turbine

```
% parameters;
clear all, clc;
M=0.047;
Ls=0.050;
Lr=0.050;
p=2;
Rr=0.29;
Rs=0.39;
Lsg=0.00525;
J=0.5;
B=25;
R=5;
Jt=6.;
Jm=4.5;
Dt=0.001;
Dm=0.001;
Kt=2700;
Km=2700;
Cri=0.001 ;
sim('ensemble',[0 2]);
plot(t,courant);
legend('courant',4);
ylabel('Courant[A] ');
xlabel('Temps [s]')
title('Courbe du courant');
grid on;

figure(2);
sim('ensemble',[0 7]);
plot(t,Pa,'b');
legend('Pa[W]',4);
ylabel('Puissance active[W] ');
xlabel('Temps [s]');
grid on;

figure(3);
sim('ensemble',[0 7]);
plot(t,Pr,'r');
legend('Pr[Var]',4);
ylabel('Puissance réactive[Var] ');
xlabel('Temps [s]')
grid on;

figure(4);
sim('ensemble',[0 2]);
plot(t,couple);
legend('couple[Nm]',4);
ylabel('couple[N.m] ');
xlabel('Temps [s]');
title('Courbe du couple électromagnétique');
grid on;

figure(5);
```

```

sim('ensemble',[0 20]);
plot(t,Pm,'r');
grid on;
xlabel('Temps[s]');
ylabel('Puissance mécanique[W]') ;
Legend ('Pm');

```

```
figure(6);
```

```

sim('ensemble',[0 20]);
plot(t,Tm,'b');
grid on;
xlabel('Temps[s]');
ylabel('Couple mécanique[Nm]') ;
legend ('Tm');

```

```

figure(7);
hold on;
sim('ensemble',[0 20]);
plot(t,Tm,'b');
grid on;
hold on;
sim('ensemble',[0 20]);
plot(t,Pm,'r');
grid on;
xlabel('Temps(s)');
legend('Tm','Pm');

```

```

figure(8);
hold on;
sim('ensemble',[0 2]);
plot(t,couple,'b');
grid;
hold on;
sim('ensemble',[0 2]);
plot(t,courant,'r');
title('Fonctionnement du générateur associé à la turbine ');
xlabel('Temps[s]');
legend('Courant[A]','Couple[Nm]',4);

```

```

figure(9);
sim('ensemble',[0 20]);
plot(t,omega,'b');
grid on;
xlabel('Temps[s]');
ylabel('Omega[rad/s]');
title('Vitesse de rotation de la turbine') ;

```

%Programme pour tracer le coefficient de puissance Cp

```

lad=0:0.01:15;
a=1;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp1=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=2;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp2=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=3;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp3=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=4;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp4=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=5;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp5=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=6;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp6=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
a=7;
invladp=1./(lad+0.08*a)-0.035/(1+a^3);
ladp=1./invladp;
cp7=0.22*(116./ladp-0.4*a-5).*exp(-12.5./ladp);
plot(lad,cp1,lad,cp2,lad,cp3,lad,cp4,lad,cp5,lad,cp6,lad,cp7);
legend('cp1[dégré]','cp2[dégré]','cp3[dégré]','cp4[dégré]','cp5[dégré]','cp6[dégré]',
'cp7[dégré]');
xlabel('Lamda');
ylabel(' Coefficient de puissance Cp');
grid ;

```

RÉSUMÉ

Ce présent travail de mémoire a pour but de convertir l'énergie éolienne à l'aide d'une machine asynchrone. Avant d'arriver à cet objectif, on a commencé par les généralités.

Ensuite, on a présenté les principes de conversion d'énergie éolienne c'est-à dire le couplage direct de la machine asynchrone. Parmi ces connexions, celle à cage d'écureuil est la plus simple, plus couramment utilisée et moins couteuse.

On a fait la modélisation la machine asynchrone en appliquant la transformation de Park .Puis, on a effectué la simulation. Les résultats nous a permis de voir les allures de la vitesse, du couple électromagnétique et du courant statorique de fonctionnement en moteur.

Enfin pour savoir le comportement de la génératrice, on a fait la simulation de l'ensemble Machine turbine et de système de deux masses. Les résultats obtenus démontrent le fonctionnement de l'éolienne. On constate que le couple électromagnétique et la puissance active deviennent négatifs.

Le travail est terminé par une implication pédagogique pour justifier le diplôme de l'Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique.

Mots clés

Vent-turbine- Éolienne-Machine asynchrone-Modélisation-Simulation/Matlab- Pédagogie.

SUMMARY

This present work of memory has for goal to convert the wind energy with the help of an asynchronous machine. Before arriving to this objective, one started with the generalities.

Then, one presented the principles of wind energy conversion that is to say the direct coupling of the asynchronous machine. Among these connections, the one to cage of squirrel is the simplest, used more fluently and less expensive.

One made the modeling the asynchronous machine while applying the transformation of Park. Then, one did the simulation. The results allowed us to see the paces of the speed, the electromagnetic couple and the current statorique of working in motor.

Finally to know the behavior of the generating, one made the simulation of the whole Plots turbine and of system of two masses. The gotten results demonstrate the working of the wind. One notes that the electromagnetic couple and the active power become negative.

Work is finished by an educational implication to justify the diploma of the Superior Normal school for the Technical teaching.

Key words

Wind-Turbine - Wind Machine-Asynchronous modeling-Simulation/Matlab - Pedagogy.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	2
LISTE DES SYMBOLES	3
LISTE DES FIGURES	4
INTRODUCTION GENERALE	6
Chapitre 1 : GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE	7
1.1 HISTORIQUE DE L'ENERGIE EOLIENNE	7
1.1.1 Définition d'une éolienne	7
1.1.2 Descriptif d'une éolienne	8
1.1.3 Principales composantes d'une éolienne	9
1.2 DIFFERENTS TYPES D'EOLIENS	9
1.2.1 Eoliennes à axe vertical	10
1.2.2 Eoliennes à axe horizontal	10
1.3 FONCTIONNEMENT D'UN AEROGENERATEUR	11
1.3.1 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	11
1.4 MARCHE DES CENTRALES EOLIENNES	12
1.4.1 Application hors réseau	12
1.4.2 Application en réseau	12
Conclusion	13
Chapitre 2 : PRINCIPES DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE	14
INTRODUCTION	14
2.1 MACHINE ASYNCHRONE	14
2.1.1 Types de machines asynchrones	14
2.1.2 Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	15
2.1.3 Equation du mouvement de la machine asynchrone	16
2.2 CHAÎNE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE	16
2.2.1 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	16
2.2.2 Puissance fournie par l'énergie du vent	17
2.2.3 Conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	18
2.3 COUPLAGE DIRECT D'EOLIEN AVEC LA MACHINE ASYNCHRONE	18
2.3.1 Connexion avec la machine asynchrone à cage d'écureuil	19
2.3.2 Connexion avec la machine asynchrone à double stator	19
2.3.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	20
Chapitre 3 : MODELISATION D'UNE MACHINE ASYNCHRONE	22
3.1 MODELE ELECTRIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE	22

3.1.1 Equations de tension en grandeurs de phase	23
3.1.2 Transformation des grandeurs réelles en grandeurs équivalentes de la machine asynchrone triphasée.	23
3.1.4 Transformation inverse	25
3.1.5 Transformation des courants	25
3.1.6 Equations des tensions	27
3.1.7 Equations des flux	28
3.1.8 Transformation de flux du stator	29
3.1.9 Transformation de flux de rotor	30
3.1.10 Equations de Park de la machine asynchrone exprimée dans les différents référentiels [5].....	31
3.1.11 Equation du couple électromagnétique.....	32
3.2 ETABLISSEMENT DU SCHEMA BLOC DE LA MACHINE ASYNCHRONE	33
3.2.1 Equations des flux	33
3.2.2 Equations des tensions.....	33
3.2.3 Les transformations de Laplace utilisées dans le schéma bloc de la machine.....	34
3.2.4 Schéma bloc de la machine asynchrone	35
Conclusion	37
Chapitre 4 : MODELISATION DE L'EOLIENNE ET SIMULATION	38
INTRODUCTION	38
4.1 MODELE DU VENT	38
4.1.1 Expressions de la vitesse du vent.....	38
4.1.2 Composantes de la vitesse du vent.....	39
4.2 ETUDE AERODYNAMIQUE DU PROFIL DES PALES	39
4.2.1 Notion sur la théorie de l'aile portance	39
4.2.2 Action aérodynamique sur l'élément de pale.....	40
4.3 MODELISATION DE LA TURBINE.....	41
4.3.1 Puissance mécanique de la turbine	41
4.3.2 Caractéristique de coefficient de puissance en fonction de l'angle de calage β et la vitesse spécifique λ	41
4.3.3 Couple mécanique de la turbine.....	42
4.3.4 Schéma bloc de la turbine	42
4.3.5 Couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine	45
4.4 RESULTATS DE LA SIMULATION.....	46
4.4.1 Résultats de la simulation de la machine asynchrone	46
4.4.2 Schéma bloc de l'ensemble machine, turbine et la partie mécanique.....	48
4.4.3.1 Fonctionnement en générateur de la machine associé à la turbine	49
4.4.3.2 Courbe de puissance active et de puissance réactive pour la vitesse du vent faible ($V=2[m/s]$).....	49
4.4.3.3 Augmentation de la vitesse du vent ($V=10 [m/s]$).....	51
4.4.3.4 Augmentation de la constante d'amortissement ($D_{i,j+1}=20 [Nms/rad]$).....	52

4.4.3.5 Augmentation de couple résistant ($C_{ri}=5[Nm/rad]$)	53
4.4.3.6 Vitesse de rotation de la turbine.....	53
Interprétation	55
Synthèse	55
Chapitre 5 : IMPLICATION PEDAGOGIQUE	56
INTRODUCTION	56
5.1 THEME1 : ETUDE THEORIQUE DE LA MACHINE ASYNCHRONE	56
5.1.1 Fiche de préparation	56
5.1.2 Présentation	57
5.1.3 Glissement.....	57
5.1.4 Fonctionnement	57
5.3 THEME 2 : ETUDE PRATIQUE D'UNE MACHINE ASYNCHRONE.....	62
5.3.2 Essais de détermination des paramètres de la machine asynchrone	63
5.3.3 Evaluation de l'enseignement.....	65
5.3.4 Entraînement au Baccalauréat Professionnel et Technique	65
5.3.5 Conseils sur l'enseignement.....	67
CONCLUSION GENERALE	68
BIBLIOGRAPHIE	69
ANNEXE	70
A.1 Paramètres utilisés.....	70
A.2 Schéma bloc de la source.....	70
A.3 Schéma fonctionnel du vent.....	71
A.4 Schéma bloc de la partie mécanique	71
A.5 Schéma bloc de la machine asynchrone avant de coupler à la partie mécanique	72
A.6 Programme de simulation	73